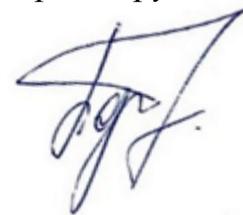


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Южно-Российский государственный политехнический университет
(НПИ) имени М.И. Платова

На правах рукописи



Борисов Константин Андреевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ
БУРЕНИЯ СКВАЖИН ПУТЕМ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ
АНОМАЛЬНОГО ИЗНОСА РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДОЛОТ PDC

Специальность 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новочеркасск – 2020

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИЗУЧЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ БУРОВЫХ ДОЛОТ, АРМИРОВАННЫХ АЛМАЗНО- ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ ПЛАСТИНАМИ PDC.....	10
1.1. Обзор и анализ известных конструкций буровых долот, армированных пластинами PDC.....	11
1.2. Обзор и анализ известных разновидностей пластин PDC	20
1.3. Цели, задачи и основные вопросы исследований.....	23
Глава 2 РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ НОРМАЛЬНОГО И АНОМАЛЬНОГО ИЗНОСА ДОЛОТ, АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИНАМИ PDC.....	26
2.1. Современное представление о теории разрушения горных пород буровыми долотами, армированными пластинами PDC..	26
2.2. Исследование нормального износа режущих элементов буровых долот, армированных пластинами PDC	32
2.3. Исследование аномального износа режущих элементов буровых долот, армированных пластинами PDC	49
2.4. Влияние крутильных и продольных колебаний на прочностные свойства буровых долот, армированных пластинами PDC.....	57
2.5. Регрессионное и нейросетевое моделирование для определения поломок пластин PDC.....	72
2.6. Моделирование отработки буровых долот, армированных пластинами PDC.....	84
Глава 3 РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ БУРОВЫХ ДОЛОТ, АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИНАМИ PDC.....	103
3.1. Разработка конструктивных параметров буровых долот.....	103
3.2. Расчет конструктивных параметров режущей части буровых долот.....	132
3.3. Разработка технологии крепления пластин PDC на корпус буровых долот.....	142
Глава 4 РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТРАБОТКИ БУРОВЫХ ДОЛОТ, АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИНАМИ PDC.....	153
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	155
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	156
ПРИЛОЖЕНИЯ	168
ПРИЛОЖЕНИЕ А	169
Акт внедрения результатов научных разработок в учебный процесс.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ В	171
Акт внедрения двухъярусных долот, армированных пластинами PDC, в практику буровых работ	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одним из основных средств поисков и разведки полезных ископаемых является бурение скважин, дающее возможность не только обнаружить их, но и вести добычу.

В России одним из основных породоразрушающих инструментов при сооружении скважин являются буровые долота, которыми бурят более 60 % от всего объема геологоразведочного бурения по горным породам от I до XII категории по буримости. К настоящему времени опубликовано огромное количество работ, посвященных конструированию и разработке технологии применения буровых долот, армированных как твердосплавными резцами, так и алмазно-твердосплавными пластинами (PDC – *polycrystalline diamond compact*).

Наибольший вклад в решение этой проблемы внесли: Г.В. Арцимович, Д.Н. Башкатов, Р.К. Богданов, К.И. Борисов, Ю.Е. Будюков, Н.Н. Буренков, В.С. Владиславлев, Б.И. Воздвиженский, С.А. Волков, В.И. Власюк, В.К. Володченко, Л.К. Горшков, А.М.Гусман, Н.Г. Егоров, А.П. Загора, А.М. Исонкин, М.Г. Крапивин, Б.Б. Кудряшов, Н.И. Куличихин, Ю.Ф. Литкевич, В.В. Нескоромных, А.И. Осецкий, А.А. Погарский, В.М. Питерский, Б.М. Рябчиков, В.И. Спирин, С.С. Сулакшин, Н.В. Соловьев, Н.И. Сысоев, В.С. Федоров, В.Ф. Чихоткин, Ф.А. Шамшев, Л.А. Шрейнер, Е.Ф. Эпштейн, Х. Вутс, Е. Галле, Д. Ламус, Х. Фулerton, В. Мауэр и др.

В настоящее время объемы бурения скважин долотами режущего типа, армированных пластинами PDC постоянно увеличиваются. Долото, работающее по принципу резания–скалывания, стало базовым инструментом буровой техники, так как из всех механизмов разрушения породы резание является наиболее эффективным, по причине того, что прочность породы на растяжение и скол значительно меньше её прочности на сжатие. В связи с этим работы, направленные на повышение эффективности бурового инструмента, армированного пластинами PDC и, как следствие его конкурентоспособности, являются достаточно актуальными. Успешная работа долот, армированных пластинами PDC, во многом зависит от эффективности его вооружения и

разрушающего воздействия на породу, а также качественной работы системы очистки забоя. От совершенства конструкции вооружения долота зависит один из самых важных технических показателей бурового инструмента – механическая скорость бурения и проходка.

Впервые резцы PDC стали известны в конце 70-х годов прошлого века, под зарубежным брендом «*Stratapak*», а позднее, претерпев изменения, получили широкую известность и свое общепринятое название – пластины PDC. Отечественный опыт применения долот, оснащенных пластинами PDC, показал, что данные резцы обладают износостойкостью, в десятки раз, и термостойкостью, в 2 раза превышающими аналогичные характеристики использовавшихся ранее вольфрамкобальтовых твердых сплавов. Долота, армированные пластинами PDC, являются высокоэффективным инструментом для бурения горных пород средней и выше средней категории по буримости (V–IX категории), при разрушении которых резцы самозатачиваются, сохраняя острые кромки длительное время. При роторном бурении и бурении винтовыми забойными двигателями долота этого типа обеспечивают прирост механической скорости проходки в 2 раза по сравнению с шарошечными долотами, а проходки на долото в 3–7 раз при осевой нагрузке в 2–2,5 раза меньшей и при сопоставимом крутящем моменте.

Актуальность исследований по разработке методических и технологических рекомендаций по повышению эффективности бурения скважин путем предупреждения аномального износа режущих элементов долот армированных пластинами PDC связана с возможностью повышения производительности бурения и снижения стоимости строительства скважин.

Целью диссертационной работы является повышения эффективности бурения скважин долотами, армированными пластинами PDC, за счет разработки и применения методических и технологических решений по снижению вибрационной нагрузки на режущее вооружение.

Основные задачи исследования:

1. Выполнить обзор и анализ известных конструкций буровых долот, армированных пластинами PDC, и различных видов пластин PDC. 2. Выполнить анализ теории разрушения горных пород и механизма износа буровых долот, армированных пластинами PDC. 3. Провести лабораторные исследования механизма нормального и аномального износа режущих пластин PDC. 4. Разработать рекомендации по технологии бурения долотами, армированными пластинами PDC для предупреждения аномального износа. 5. Разработать рекомендации по конструкциям долот, армированных пластинами PDC предупреждающих аномальный износ.

Идея работы заключается в создании алгоритма прогнозирования нормального износа, а также распознавания и предупреждении аномального износа долот, армированных пластинами PDC, в процессе бурения скважины.

Объектом исследований является породоразрушающий инструмент – буровые долота, армированные пластинами PDC.

Методы научных исследований включают в себя: анализ и обобщение имеющихся теоретических, лабораторных и промысловых материалов по данной проблеме; обработку результатов собственных аналитических и лабораторных исследований; построение эмпирических моделей на основании корреляционного, регрессионного и нейросетевого анализа с использованием современных приборов, установок и вычислительной техники.

Научная новизна работы:

1. Установлена зависимость интенсивности нормального изнашивания пластин PDC по высоте в зависимости от технологического режима бурения для пород с известной абразивностью и контактной прочностью, позволяющая прогнозировать наработку и производительность бурения долотами, армированными пластинами PDC.

2. Установлена зависимость, позволяющая прогнозировать возникновение аномального износа пластин PDC в зависимости от толщины срезаемого слоя породы, контактной прочности буримой породы,

конструктивных особенностей долота, схемы расстановки вооружения, осевой нагрузки на долото, частоты его вращения и текущего износа пластин PDC.

Научное значение работы заключается в развитии теории функционирования и надежности режущих элементов буровых долот путем использования системного подхода в определении оптимальных значений износостойкости пластин PDC, обоснования научных положений, направленных на разработку методов повышения долговечности породоразрушающего инструмента. В диссертации выполнено теоретическое обобщение и решение научной проблемы по технологии отработки буровых долот, армированных пластинами PDC.

Научные положения выносимые на защиту.

1. Полученные зависимости для определения интенсивности изнашивания режущего вооружения буровых долот PDC, в зависимости от характеристик горной породы целесообразно применять при проектировании буровых работ, и разработке породоразрушающего инструмента.

2. Полученные нейросетевые модели, позволяющие прогнозировать интенсивность аномального изнашивания резцов PDC буровых долот, целесообразно применять при разработке технологии бурения с целью повышения эффективности буровых работ и повышения качества отработки буровых долот.

3. Существенное повышение проходки на долото PDC при бурении горных пород V–IX категории по буримости достигается за счет применения их двухъярусной конструкции в сочетании с усиленным антивибрационным вооружением, обеспечивающих формирование ступенчатого забоя.

Практическая значимость работы заключается в: 1) прогнозировании износа и поломок режущих элементов двухъярусных долот режуще-скалывающего типа в зависимости от конструктивных особенностей долота, схемы расстановки вооружения, осевой нагрузки на долото, частоты его вращения и текущего износа пластин PDC; 2) создании математических моделей для прогнозирования аномального износа резцов PDC; 3) разработке, на уровне

изобретения, конструкции долот режуще-скалывающего типа, армированных пластинами PDC; 4) использовании материалов диссертации в учебном процессе кафедры «Нефтегазовая техника и технологии» ЮРГПУ (НПИ) при изучении дисциплин «Технология бурения нефтяных и газовых скважин» и «Строительство нефтяных и газовых скважин в сложных условиях».

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и одобрены на 5-ти международных конференциях: Международной научно-практической конференции «Бурение скважин в осложнённых условиях», Санкт-Петербургский горный университет, 2016; Международной научно-практической конференции «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ)», 2018; III Международной научно-практической конференции «Бурение скважин в осложненных условиях». Санкт-Петербургский горный университет, 2018; Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы недропользования», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2019; Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы геологии», Старооскольский филиал ФГБОУ ВО МГРИ, 2019.

Публикации. Основные научные положения и результаты диссертационной работы отражены в 22 научных работах, в том числе в 3-х работах, в рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК), 9 работах, входящих в международную базу цитирования SCOPUS, 1 патенте на изобретение.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается необходимым научным обоснованием основных положений и выводов, выполненных в пределах заданной точности; использованием методов системного анализа и математического моделирования при исследовании, формализации и решении поставленных задач, а также анализом результатов; выводы сделанные по результатам работы являются достоверными, основные положения работы обсуждены и прошли апробацию на конференциях.

Личный вклад автора заключается в формулировании и доказательстве основных научных положений, непосредственном участии на всех этапах исследований, получении теоретических и экспериментальных данных, подготовке основных публикаций и внедрении результатов исследований.

При выполнении диссертационных исследований соискателем лично получены следующие результаты:

1. Получены зависимости определения интенсивности изнашивания PDC по высоте от времени при бурении пород средней и выше средней крепости.
2. Разработана методика расчета технологических параметров и их связь с формированием нормального и аномального износа пластин PDC буровых долот, которая обосновывается за счет крутильных колебаний буровой колонны.
3. На основании полученных данных предложены конструкции двухъярусных антивибрационных буровых долот, армированных пластинами PDC.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех глав, основных выводов и рекомендаций, изложенных на 172 страницах текста в редакторе MS Word, содержит 82 рисунка, 16 таблиц, список использованных источников из 100 наименований и двух приложений.

Работа выполнена на кафедре «Нефтегазовые техника и технологии» ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова и на кафедре «Современные технологии бурения скважин» МГРИ. При подготовке диссертации использованы также материалы экспериментальных исследований, выполненных по госконтракту с Фондом содействия инновациям, программа «Старт-1» по теме: «Разработка и лабораторные испытания образца двухъярусного долота принципиально нового вида» (договор № 3324ГС1/55594 от 16 декабря 2019 г.).

Автор считает своим долгом выразить признательность сотрудникам кафедры «Нефтегазовые техника и технологии» ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова, а также сотрудникам кафедры «Современные технологии бурения скважин» МГРИ имени Серго Орджоникидзе за оказанную поддержку и рекомендации при выполнении диссертационной работы.

Содержание работы

Во введении дается общая характеристика выполненной работы, обосновывается ее актуальность, приводится научная новизна и защищаемые положения, даются сведения о личном вкладе автора и апробации работы.

В первой главе дается обзор современного состояния вопроса и задач исследования. Проводится анализ известных конструкций буровых долот, армированных алмазно-твердосплавными пластинами PDC, разновидностей режущих пластин PDC, обозначены цели, задачи, основные вопросы исследования.

Во второй главе описывается разработка теоретических основ прогнозирования износа и поломок режущих пластин PDC и методики расчета наработки долот, описано современное представление о теории разрушения горных пород буровыми долотами, проведено исследование износа и поломок режущих элементов буровых долот, армированных пластинами PDC. Выполнена разработка аппарата регрессионного и нейросетевого моделирования для прогнозирования износа и поломок пластин PDC. На основании выполненных исследований предложены, на уровне изобретений, оптимальные конструкции антивибрационных долот.

Третья глава посвящена разработке рекомендаций по современным конструкциям буровых долот, армированных PDC. Приведен расчет конструктивных параметров режущей части буровых долот.

В четвертой главе приведен расчет экономической эффективности.

В заключении приводятся основные выводы и рекомендации.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИЗУЧЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ БУРОВЫХ ДОЛОТ, АРМИРОВАННЫХ АЛМАЗНО-ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ ПЛАСТИНАМИ PDC

В 1973 г, фирмой «General Electric» было разработано первое безопорное долото, армированное поликристаллическими алмазно-твердосплавными резцами. Разработанное долото позволило обеспечить разрушение горной породы режуще-скалывающим методом. При этом была уменьшена удельная энергия, необходимая для разрушения породы, увеличена механическая скорость проходки и общая наработка на долото

После первых опытов фирмы «General Electric» другие производители буровых долот стали проявлять интерес к резцам «Comрах» (позднее «Stratarрах») и соответствующей технологии их работы, Так в 1974 г. Фирма «Drilling and Service» разработала первые конструкции долот с резцами «Comрах» для бурения нефтяных скважин в Европе; в 1978 г. – долото серии S с удлиненной опорой, резцов «Stratarрах» в форме дисков, закрепленных к твердосплавным цилиндрам. Разработанные долота использовались при строительстве скважин в северной части Северного моря.

В 1979 г. были разработаны долота с лопастной матричной конструкцией серии S16. В этом же году впервые начались исследования динамических сил, возникающих при бурении долотами PDC. Опыт фирмы «Drilling and Service» показал, что резцы должны выдерживать динамические нагрузки в 20 раз превышающие статические [3; 19].

В 80-х годах прошлого столетия долота, армированные PDC, имели уже широкое применение за рубежом. К концу 1990 года объем бурения данным типом долот в мире составлял 45 % от всего объема бурения на нефть [98].

Отечественные производители стали разрабатывать долота, армированными PDC только в начале 2000-х годов. С 2005 по 2006 года наблюдался период активной разработки долот, армированных пластинами PDC в РФ. В это время ОАО «Волгабурмаш» было внедрено более 80 различных

конструкций долот, армированных пластинами PDC. За счет работы над совершенствованием конструкций долот и их адаптации к условиям различных месторождений удалось добиться положительных результатов. В дальнейшем долота, армированные пластинами PDC, стали стремительно завоевывать популярность, вытесняя с рынка долота шарошечного типа [96; 97].

1.1. Анализ известных конструкций буровых долот, армированных пластинами PDC

Эффективность бурения горных пород зависит от множества технических и технологических: от конструктивных особенностей породоразрушающего инструмента (ПРИ) [21-23], материалов, из которых изготовлен ПРИ, его упрочнения, забойных условий и применяемых буровых растворов, технологии и режимов бурения скважин. Выбор наилучшего породоразрушающего инструмента для конкретных условий бурения является одной из проблем, с которой приходится сталкиваться нефтегазовым и сервисным компаниям при строительстве скважин различного назначения. В настоящее время до 90 % объема бурения скважин различного назначения выполняется с применением буровых долот, армированных алмазно-твердосплавными пластинами PDC.

Разработка и промышленный выпуск безопорных буровых долот, армированных пластинами PDC, позволило в последние годы совершить прорыв в технологии бурения, заключающийся в кратном росте проходки на буровое долото, по сравнению с трехшарошечными долотами, увеличении скорости бурения и сокращении времени на спуско-подъемные операции.

Долота, армированные зубками PDC, обладают высокой износостойкостью и работоспособностью, а также обеспечивают кратное увеличение проходки за долбление, повышая при этом механическую скорость бурения. Отсутствие движущихся и вращающихся частей продлевает ресурс работы алмазного долота по сравнению с шарошечными долотами. Все это делает работу алмазного долота более эффективной и менее аварийной [12, 16, 64].

В настоящее время на российском рынке представлен широкий спектр долот, армированных пластинами PDC, выпускаемых различными российскими

производителями, самыми крупными из которых являются: ООО НПП «Буринтех», ОАО «Волгабурмаш», АО НПП «Бурсервис», ОАО «Уралбурмаш», АО «Удмурские долота» («УДОЛ»), СП ЗАО, ООО «Универсальное Бурение», ООО «БТК»; среди зарубежных можно выделить – «Varel International», «Baker Hughes», «SmithBits», «National Oilwell Varco», «Halliburton», «Tercel», «DMI», «Kingdream», «Hejian Hengji Bit Manufacture Co., Ltd.», «Cangzhou Great Drill Bits Co., Ltd.», REED «Hycalog» и другие.

ООО НПП «БУРИНТЕХ» выпускает следующие линии долот: матричные для бурения с высокими механическими скоростями в средних и твердых высокоабразивных горных породах диаметром 107–444,5 мм; серий «РН» – оптимизированы специально для бурения с высокими механическими скоростями проходки, диаметром 215,9–220,7 мм; «РТ» – оптимизированы специально для бурения с высокими механическими скоростями проходки в нестабильных и изменчивых по разрезу горных породах, диаметром 114,3–295,3 мм.

АО «НПП «БУРСЕРВИС» производит следующие серии долот:

– BS – линейка долот, армированных пластинами PDC, диаметром 120,6–393,7 мм предназначенных для бурения вертикальных и наклонно-направленных участков скважин преимущественно в мягких и средних породах;

– KAIMAN SDD – серия долот, армированных пластинами PDC, диаметром 123,8–295,3 мм разработанная для бурения в условиях сложных карбонатных разрезов;

– BULAVA – серия долот, армированных пластинами PDC, диаметром 123,8–295,3 мм для эффективного разбуривания средне-твердых пород.

ОАО «Волгабурмаш» выпускает следующие линии лопастных долот, армированных пластинами PDC:

– FastDrill и SmartFastDrill – линии долот, армированных пластинами PDC со стальным корпусом диаметром 83,0–444,5 мм и 123,8–393,7 мм соответственно;

– FastDrillMatrix – линия долот, армированных пластинами PDC с твердосплавным корпусом, предназначенные для бурения скважин в осложненных горно-геологических условиях диаметром 311,1 мм.

ОАО «Волгабурмаш» освоило производство алмазных долот со стальным корпусом, оснащенным поликристаллическими алмазными зубками (PDC), для бурения вертикальных, наклонно-направленных, горизонтальных нефтяных и газовых скважин в малоабразивных породах с промывкой водой или глинистым раствором.

ОАО «Волгабурмаш» сотрудничает с лидирующими американскими производителями пластин PDC, что позволяет оснащать долота высококачественными алмазными резцами.

Алмазные долота оснащены твердосплавными сменными насадками (рис. 1.8), ориентированными так, чтобы максимально обеспечить баланс потоков бурового раствора для очистки долота и забоя. Буровое долото, армированное пластинами PDC, показано на рис. 1.1 [65].



Рис. 1.1. Буровое долото, армированное пластинами PDC

Наибольший интерес представляют следующие линии долот (рис. 1.2):

- BULAVA производства АО «НПП «БУРСЕРВИС»;
- FASTDRILLMATRIX производства АО «Волгабурмаш».

Наблюдаемое в настоящее время стремительное расширение области применения буровых работ и повышение их технической сложности выводят совершенствование долот и технологии их применения на новый уровень, как одно из приоритетных направлений развития буровой техники. А повышение производительности и наработки долот значительно повышает технико-экономическую эффективность процесса бурения [65].

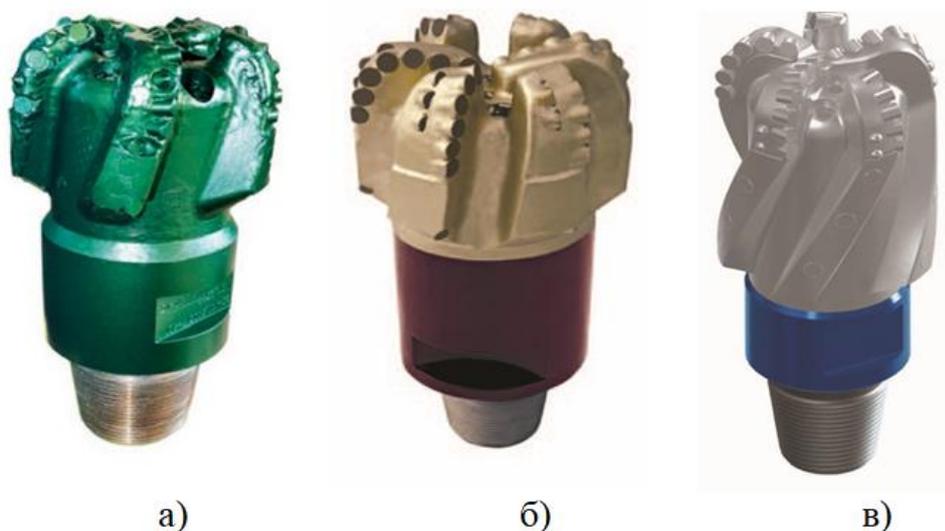


Рис. 1.2. Буровые долота, армированные пластинами PDC:

- а) долото BULAVA производства АО «НПП «БУРСЕРВИС»; б) долото FASTDRILLMATRIX производства АО «Волгабурмаш»; в) долото серии «РТ» производства ООО НПП «БУРИНТЕХ»

Буровые долота, армированные пластинами PDC, выпускаются трех, четырех, пяти, шести, семи, восьми, девяти и двенадцатиллопастные. Также выпускаются бицентричные буровые долота, армированные пластинами PDC, предназначенные для бурения с одновременным расширением ствола вертикальных и наклонно-направленных скважин. примеры лопастных долот, армированных пластинами PDC, показаны на рис. 1.3.

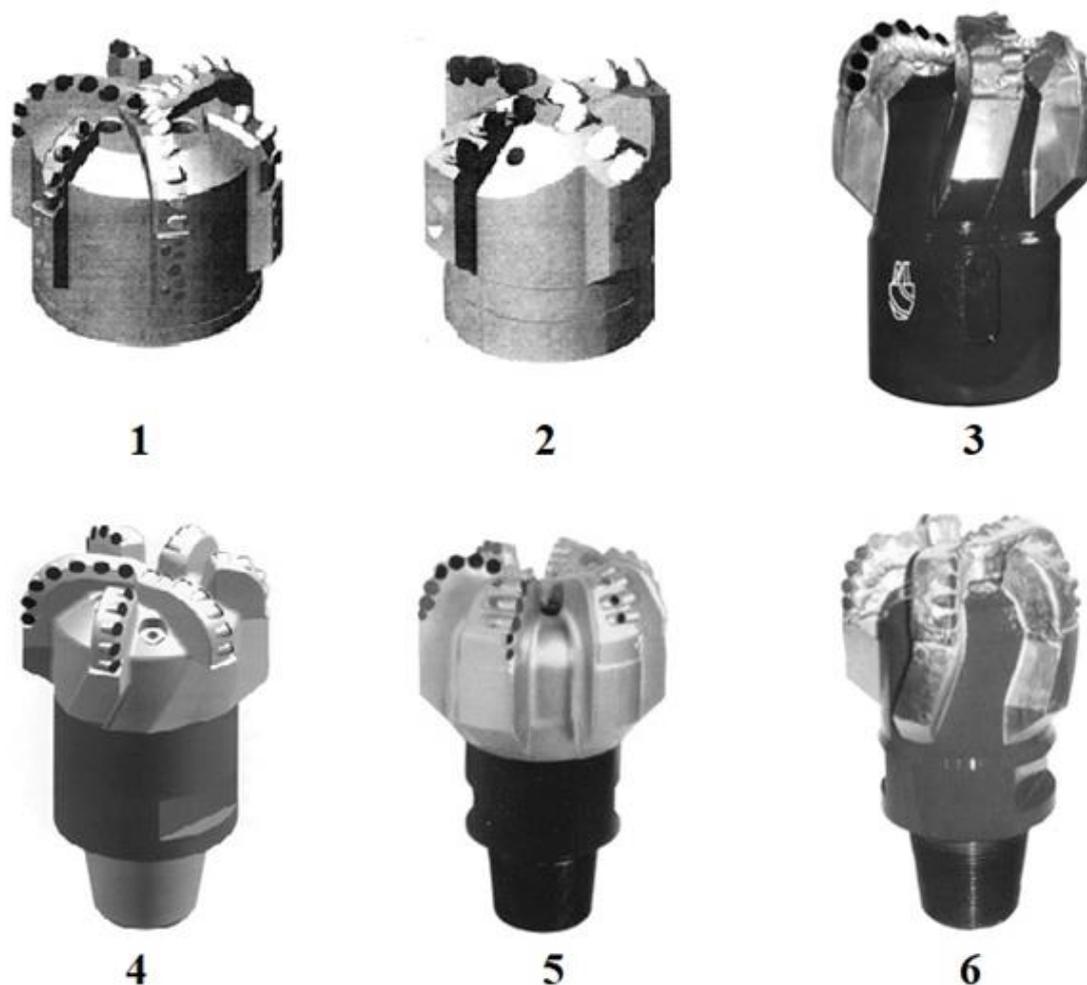


Рис. 1.3. Примеры лопастных долот, армированных пластинами PDC:
 1 – Л-РСА ННlil «Азимут»; 2 – РСА НПП «Азимут»; 3 – БИТ2-214,3 М5 ООО НПП
 «Буринтех»; 4 – 200,0 FDM-A07 ОАО «Волгабурмаш»; 5 – МР/SP PDC; 6 – БИТ 188,9 М5
 ООО НПП «Буринтех»

Устройство долота, армированного пластинами PDC, показано на рис. 1.4.

На каждом долоте имеется выемка с серийным номером или так называемая характеристика долота (рис. 1.5).

На рис. 1.6 представлена номенклатура долот, армированных пластинами PDC, которые в настоящее время изготавливаются.

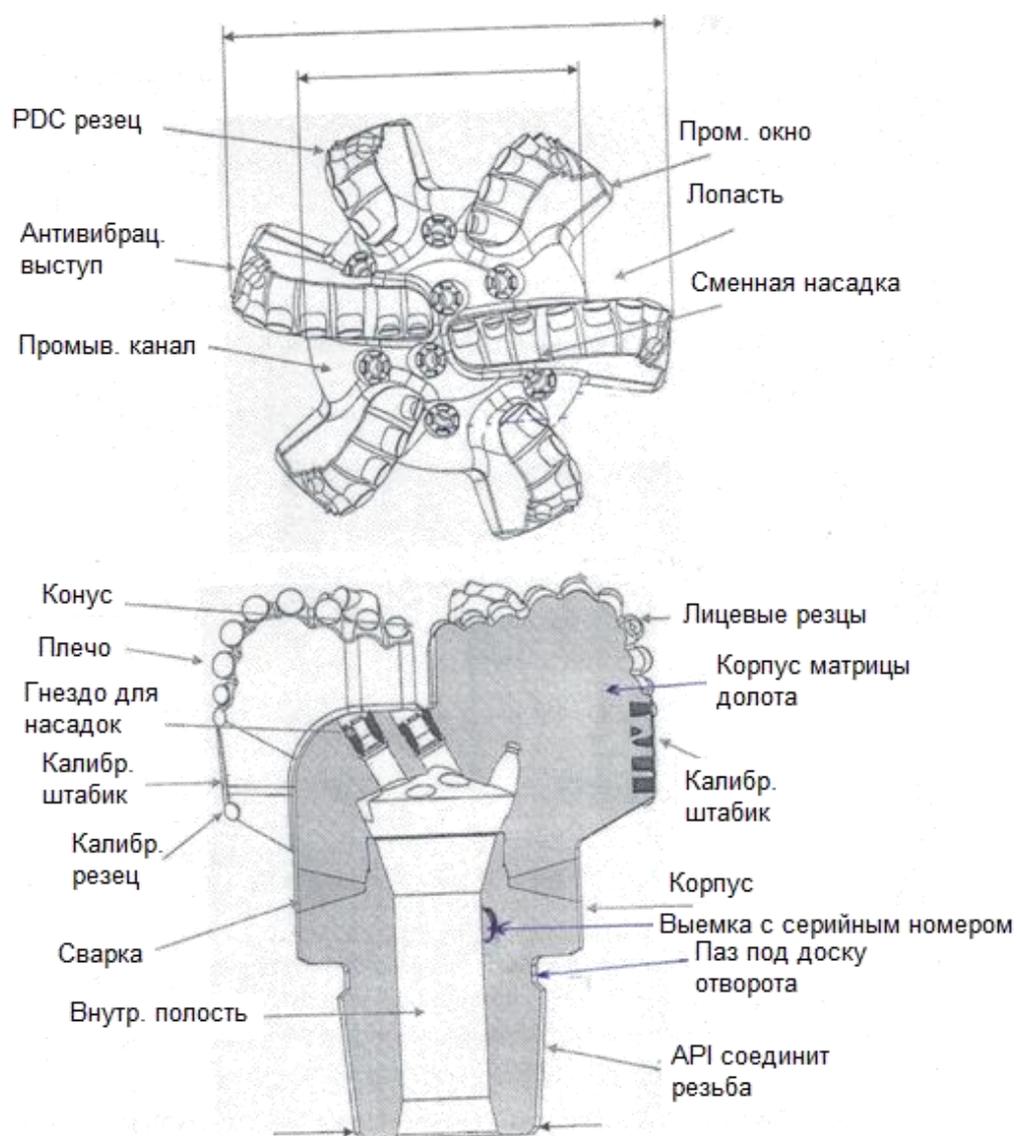


Рис. 1.4. Устройство долота, армированного пластинами PDC

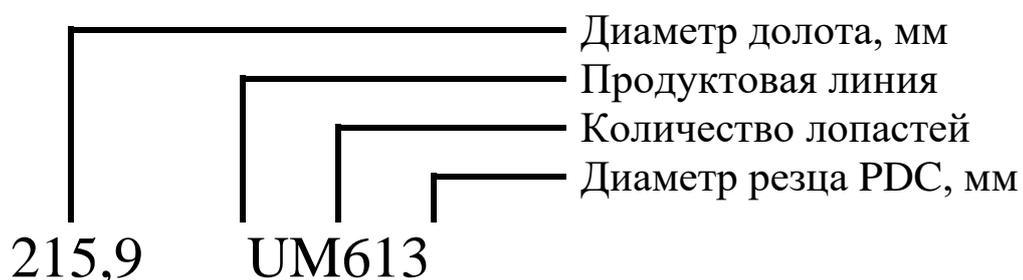


Рис. 1.5. Характеристика долота

Для конкретных условий бурения диаметр и конструкция долота определяется по требованию заказчика.

Диаметр		Количество лопастей									
дюйм	мм	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3 ¼	83,0										
3 ¾	95,4										
3 7/8	98,4										
4 1/8	104,8										
4 ½	114,3										
4 ¾	120,6										
4 7/8	123,8										
5 ½	139,7										
5 5/8	142,9										
5 ¾	146,0										
5 7/8	149,2										
6	152,4										
6 1/8	155,6										
6 ¼	158,8										
6 ½	165,1										
6 ¾	171,4										
7 5/8	193,7										
4 7/8	200,0										
8 3/8	212,7										
8 ½	215,9										
8 11/16	220,7										
8 ¾	222,2										
9 ½	241,3										
9 7/8	250,8										
10 5/8	269,9										
11	279,4										
11 5/8	295,3										
12	304,8										
12 ¼	311,1										
13 ½	342,9										
13 ¾	349,2										
14 ½	368,3										
14 ¾	374,6										
15 ½	393,7										
16	406,4										
17 ½	444,5										
20	508,0										
22	558,8										
23	584,2										
24	609,4										
26	660,4										

Рис. 1.6. Номенклатура долот, армированных пластинами PDC

В настоящее время курс развития долотного производства направлен на адаптацию долот для повышения эффективности их использования в горных породах средних и выше средних по твердости [33, 60]. Производители долот, армированных пластинами PDC, предлагают различные конструктивные решения, основное назначение которых – снижение уровня вибрации на долоте. В тоже время при разработке технологических программ на бурение в условиях

переслаивающихся средних по твердости и твердых горных пород, выбору рационального антивибрационного вооружения в конструкции долота, армированного пластинами PDC, не всегда уделяется достаточное внимание. Большое количество буровых и сервисных компаний, применяющих долота, армированные пластинами PDC, руководствуются в основном кодами Международной ассоциации буровых подрядчиков (IADC) и общим описанием в каталогах производителя для выбора. Одна из причин такого положения заключается в отсутствии научно обоснованных методических и технологических решений по выбору долот, армированных пластинами PDC, с усиленным антивибрационным вооружением, что приводит к нерациональному использованию конструктивных особенностей таких долот.

Стоимость буровых долот, армированных резцами PDC, составляет до шести процентов от общей стоимости скважины, но является основным компонентом экономики сооружения скважины. Улучшение качества долот в последнее время стало возможным благодаря применению современных материалов и технологий производства в сочетании с конструктивными улучшениями. Усовершенствование гидравлики долот и качества режущего вооружения позволило получить более совершенную конструкцию породоразрушающего инструмента с фиксированными вращающимися и съемными резцами PDC.

Долота, армированные пластинами PDC, имеют множество конструктивных отличий в зависимости от горно-геологических условий их применения и проектируемой траектории скважины, и могут отличаться: способом закрепления резцов, конструкцией промывочных систем, материалом корпусов, типом и размером применяемых PDC пластин. Как правило, такие долота вооружены пластинами PDC диаметром от 8 до 19 мм, представляющими собой слой подвергнутых спеканию под давлением порядка 6–8 ГПа и температуре около 1500 °С поликристаллических алмазов на подложке из карбида вольфрама. В настоящее время многие заводы, как в России, так и зарубежом

выпускают долота, армированные резцами PDC с различными антивибрационными опциями, продлевающими срок службы долота.

Антивибрационные опции можно разделить на *основные* (рис. 1.7, а) и *второстепенные* (рис. 1.7, б). Основными являются: двухрядное расположение резцов PDC (расположение дополнительного ряда резцов PDC за основным); стабилизационные вставки на лопастях плоской, сферической и конусной форм.

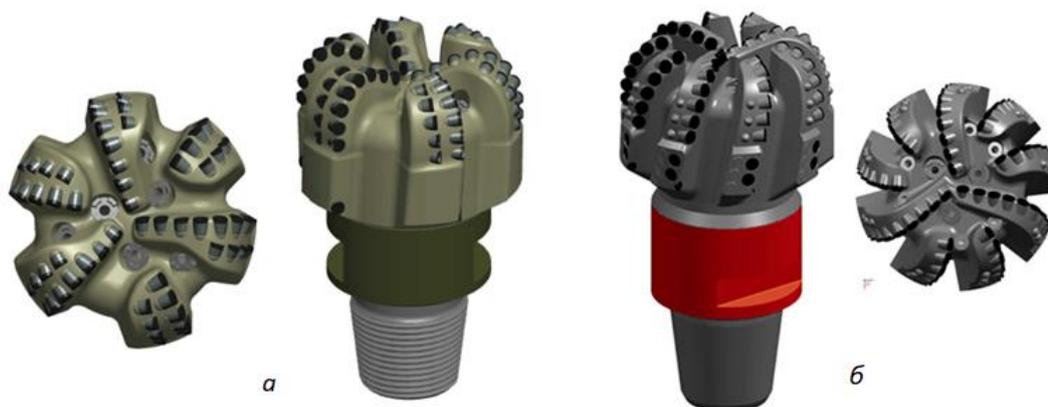


Рис. 1.7. Основные антивибрационные опции:

- а) долото PDC с двухрядным расположением резцов; б) долото PDC с стабилизационными вставками на лопастях

Второстепенные включают в себя: импрегнированную защиту за резцом; защитное твердосплавное покрытие и регулировка выступа резца над этим покрытием; выпуклые конические резцы; резцы овальной формы.

Оценив ситуацию по состоянию вопроса изученности конструкций долот режуще-скалывающего типа, необходимо отметить, что в настоящее время получен большой опыт эксплуатации долот, армированных пластинами PDC. Анализ эксплуатации таких долот показал, что достойной альтернативы им пока нет. Но, в тоже время, существует еще целый ряд проблем и нерешенных вопросов, как по улучшению конструкций, так и по разработке инновационных технологий изготовления долот и их отработки. Вопросам разработки антивибрационных буровых долот, армированных пластинами PDC, и технологии их использования, с учетом нормального и аномального износа, посвящены следующие главы диссертационной работы.

1.2. Обзор и анализ известных разновидностей пластин PDC

Пластины PDC состоят из алмазного слоя, синтезированного на твердосплавной подложке, за счет чего обеспечивается высокая ударная прочность и износостойкость таких пластин. Отсутствие плоскостей спайности в алмазном слое позволяет по мере износа пластин постоянно сохранять острые кромки, которые эффективно срезают породу. Это обеспечивает поддержание механической скорости проходки в течение всего периода работы долота. В долото такие пластины могут монтироваться различными путями: устанавливаться в гнезда, выполненные на лопастях долота; припаиваться к державкам цилиндрической формы, вмонтированным в корпус долота; припаиваться к державкам цилиндрической формы, впаянным в гнезда, выполненные в матрице долота.

На сегодняшний день одним из основных ресурсов повышения эффективности (как технико-экономических, так и качественных показателей) бурения долотами PDC является внедрение специальных более износостойких резцов, обладающих следующими свойствами: большей ударной, абразивной и термомеханической стойкостью (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Резцы PDC

Конструктивные особенности пластин могут быть самые разнообразные: цилиндрические и вертикальные (рис. 1.9), клиновидные (рис. 1.10, а), конические (рис. 1.10, б) и иной формы (рис. 1.10, в).



Рис. 1.9. Цилиндрические и вертикальные пластины PDC

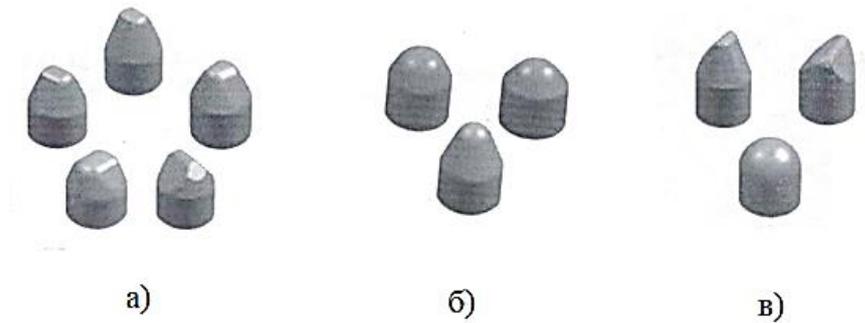


Рис. 1.10. Конструктивные особенности пластин PDC

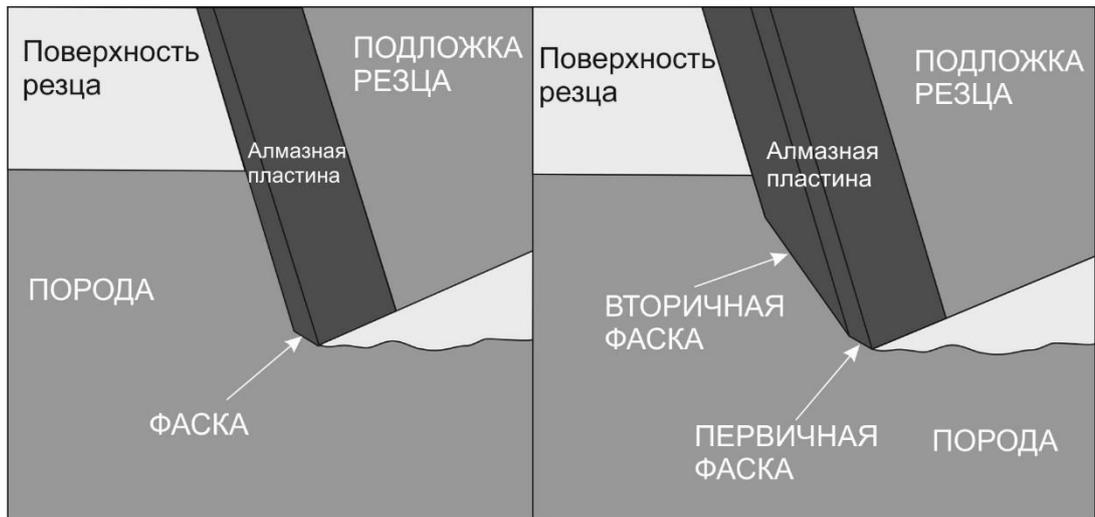
Фирмой «Шлюмберже» разработаны алмазные пластины гребнеобразной формы – Ахе, сочетающие срезающее действие стандартной пластины PDC и дробящее действие пластины из карбида вольфрама (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Гребнеобразная пластина

В настоящее время известна новая технология Stabilis производства резцов PDC компании «Бейкер Хьюз» [32], которые работают в условиях высоких температур и высокого давления, а также отличительная их геометрия, включающая основную фаску и дополнительную, которая увеличивает стойкость резца, тем самым продлевая проходку долота без снижения механической скорости. С помощью технологии Stabilis сопротивление резца к трещинам можно увеличить до двух раз и более. Резец с двойной фаской

включает основную грань, идентичную со стандартным резцом, которая переходит на большую грань по направлению к торцевой части резца (рис. 1.12).



1 - Стандартный резец

2 - Резец с двойной фаской

Рис. 1.12. Стандартный резец (1) и резец с двойной фаской Stabilis (2)

Конструкции долот Varel также оснащаются оригинальными конструкциями овальных резцов. Конструкция овальных резцов (рис. 1.13) позволяет создавать долота с увеличенной на 43–46 % (в зависимости от типоразмера) глубиной внедрения в породу при той же ширине резца.



Рис. 1.13. Вооружение PowerCutter™ Varel

Овальная форма резцов, увеличенная глубина их внедрения обеспечивает повышенный ресурс долота и таким образом снижает стоимость бурения интервала. Кроме того, резцы овальной формы создают повышенные, по срав-

нению с обычными резцами той же ширины, контактные напряжения, что позволяет более эффективно распределять и использовать приложенные к долоту нагрузки, а также снизить интенсивность износа [66].

Компания Smith Bits (дочернее предприятие Schlumberger) объявила о выводе на рынок принципиально новой технологии – вращающихся на 360° в процессе бурения алмазных резцов ONYX 360. Резцы ONYX 360 (рис. 1.14) располагаются в тех областях буровых долот, которые подвержены наибольшему износу. При вращении новые резцы используют всю свою алмазную поверхность для срезания горной породы, распределяя тем самым износ равномерно вдоль всей окружности (традиционные алмазные резцы срезают породу лишь малой частью своей поверхности). Вращающиеся на 360° алмазные резцы ONYX также снижают объемы тепла, выделяемого при трении о породу. В результате уменьшается износ долот.



Рис. 1.14. Резцы ONYX 360

Постоянное улучшение конструкций и более точный подбор PDC долот, особенно их вооружения, являются важнейшими условиями для увеличения механической скорости и стойкости породоразрушающего инструмента, что сокращает затраты на бурение [66].

1.3. Цели, задачи и основные вопросы исследований

Целью работы является повышение эффективности бурения скважин долотами PDC за счет разработки и применения методических и

технологических решений по снижению вибрационной нагрузки на режущее вооружение долот.

В настоящее время различными предприятиями изготавливается большое количество буровых долот, армированных пластинами PDC. По конструктивным решениям долота представляют широкий спектр, но до настоящего времени не разработаны долота, армированные пластинами PDC, способные эффективно бурить скважины в различных геологических условиях с категорией по буримости горных пород от I до X включительно до проектной глубины скважины, без замены долота. Над решением этих вопросов работают многие ученые, научно-конструкторские и производственные предприятия.

Наработки буровых долот, армированных пластинами PDC, зависят от износа режущих элементов, но, несмотря на то, что износостойкость пластин PDC в 50–100 раз превышает износостойкость резцов вольфрамкобальтовых твердых сплавов, на каждом из отработанных долот количество нормально и аномально изношенных (поломанных) режущих элементов примерно одинаково. Поэтому выяснение причин износа и поломки PDC на буровых долотах является актуальной задачей.

В настоящее время более 80 % от общего объема бурения скважин различного назначения сооружается с помощью долот, армированных пластинами PDC.

Известно, что изнашивание долот, армированных пластинами (резцами) PDC происходит за счет: 1) износа резцов – до 30 %; 2) поломка резцов – до 50 %; 3) потери резцов – до 20 %. Таким образом, за счет износа и поломок пластин PDC до 80 % долот выходят из строя. Эти вопросы являются актуальными и требуют своего решения.

Основные вопросы исследования – разработать и изготовить антивибрационные долота, армированные пластинами PDC, которые позволили бы оптимизировать технологию их отработки с учетом износа и поломок. Основные задачи диссертационной работы будут решаться на основе теоретических, экспериментальных и практических исследований. В лабораторных условиях будут выполняться механические испытания,

металлографические исследования, электронно-микроскопический, спектрометрический и рентгеноструктурный анализ.

Экспериментальные работы будут выполняться в ЮРГПУ(НПИ) в центре коллективного пользования «Нанотехнологии» и на кафедре «Нефтегазовые техника и технологии». Производственные испытания долот, армированных PDC, будут выполняться в ООО НПП «Ростовская буровая компания».

Выполненный анализ конструкций буровых долот, армированных пластинами PDC, позволил сформировать цели, задачи и основные вопросы исследований, решению которых и посвящена данная диссертационная работа.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ НОРМАЛЬНОГО И АНОМАЛЬНОГО ИЗНОСА ДОЛОТ, АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИНАМИ PDC

2.1. Современное представление о теории разрушения горных пород буровыми долотами, армированными пластинами PDC

Процесс резания горных пород, независимо от категории их твердости, во много раз эффективнее процесса вдавливания, так как затрата энергии при резании растет значительно медленнее, чем увеличение объема отделяемой породы. Следовательно, наиболее эффективным методом разрушения породы является метод резания, несмотря на кажущуюся парадоксальность этого вывода, так как известно, что инструменты режущего типа в настоящее время имеют ограниченную область применения из-за того, что они изнашиваются при резании значительно интенсивнее, чем при дробящем методе.

Разрушения горных пород при бурении является сложным процессом, в котором задействовано большое число факторов технического характера. Причем факторы эти имеют стохастическую природу – это относится как к показателям физико-технических и горно-технологических свойств горных пород, так и к режимным параметрам процесса бурения. Многие факторы коррелированы между собой и с различной степенью воздействуют на выходные критерии: механическую скорость бурения, скорость износа рабочих органов, удаление продуктов разрушения пород и другие. Указанные обстоятельства существенно затрудняют всестороннюю оценку процесса разрушения горных пород при бурении, требуют оптимального сочетания использования аналитических, экспериментальных и модельных методов.

Вклад в развитие отдельных разделов теории и практики разрушения горных пород при бурении долотами внесли отечественные исследователи: Л.А. Шрейнер, В.С. Федоров, С.А. Волков, Б.И. Воздвиженский, В.С. Владиславлев, А.И. Осецкий, С.С. Сулакшин, Н.В. Соловьев, В.И. Спиринов, В.И. Власюк, Д.Н. Башкатов, М.Г. Крапивин, В.В. Нескоромных, К.И. Борисов, Ю.Е. Будюков,

В.М. Питерский, Л.К. Горшков, А.М. Гусман, В.Ф. Чихоткин, Р.К. Богданов, А.П. Загора, А.М. Исонкин. Из зарубежных исследователей – Х. Вутс, Е. Гале, Х. Фулerton, Д. Ламус, В. Мауэр и другие. Зарубежные исследования, в отличие от отечественных, характеризуются большей практической направленностью, ведущие зарубежные фирмы основное внимание уделяют качеству и более широкой номенклатуре выпускаемой продукции.

В настоящее время в практике бурения, главным образом, используют механические способы разрушения в комбинации с гидродинамическим воздействием струи бурового раствора на породу. В относительно небольших объемах применяют огневое бурение для сооружения взрывных скважин в крепких породах на карьерах. Физические способы разрушения горных пород при бурении по существу не используются. Взрывное, эрозионное, кавитационное, ультразвуковое, гидродинамическое и другие способы в своё время прошли широкую апробацию как у нас в стране, так и за рубежом. Однако они оказались неконкурентоспособными в сравнении с механическим способом и поэтому не получили практического использования.

Разрушение горных пород тесно связано с двумя другими технологическими процессами [57]: удалением продуктов разрушения породы из призабойной зоны и охлаждением рабочих элементов ПРИ. Перегрев пластин PDC в микрообъемах поверхностных слоёв ведет к термодеградациии режущих элементов [51, 52], при температурах выше 500–700°C и скорости резания в линии резания более 3 м/с, а несвоевременное удаление продуктов разрушения породы с забоя не только затрудняет взаимодействие ПРИ со свежей породой, снижая скорость бурения, но и приводит к дополнительному износу инструмента [53].

Не менее важно охлаждать рабочие органы инструмента, не допуская их перегрева. При температурах более 500–600°C возможно ослабление металла пайки твердого сплава и снижение прочностных характеристик твердого сплава [68, 81, 83].

Основной вклад в создание эффективных ПРИ и технологии их использования в различных условиях внесли отраслевые НИИ и заводы-изготовители: Институт горного дела им. А.А. Скочинского, Всероссийский НИИ буровой техники, Специальное конструкторское бюро Министерства природных ресурсов, Всероссийский научно-исследовательский институт техники разведки, Государственное научно-исследовательское геологическое предприятие (ТулНИГП), Терский завод алмазного инструмента, Институт сверхтвердых материалов Национальной академии наук Украины, Верхне-Сергиевский, Волжский и другие.

При вращательном бурении внедрение резцов в породу происходит под действием осевого усилия. Под действием окружного усилия разрушение породы распространяется по всему забою. Одновременно действие осевых и вращающих усилий приводит к непрерывному разрушению породы забоя спиральными слоями с очень малым углом наклона.

Накопленный с конца 70-х годов XX века зарубежный (резцы «Stratapak» и PDC) и отечественный опыт применения породоразрушающих инструментов, оснащенных пластинами PDC, показал, что такие материалы обладают износостойкостью в десятки раз и термостойкостью, в 2 раза превышающей аналогичные характеристики вольфрамокобальтовых твердых сплавов. Алмазно-твердосплавный инструмент высокоэффективен для бурения мягких и средних пород, при разрушении которых резцы сохраняют острые кромки длительное время [75, 86, 87]. При роторном и турбинном бурении инструменты с PDC обеспечивают увеличение механической скорости проходки в 2 раза по сравнению с шарошечными долотами, и проходки на долото в 3–5 раз при осевой нагрузке в 2–5 раза меньшей при сопоставимом крутящем моменте [45,72,].

Исследования по износу долот, армированных PDC, выполнялись в лабораторных условиях с помощью, электронных весов и многофункционального растрового электронного микроскопа QUANTA 200HV. Основные параметры QUANTA 200HV: разрешение 3,5 нМ при 30 кВ, увеличение от 7 до

1000000 раз, ускоряющее напряжение от 200 В до 20 кВ, вывод изображения осуществляется на дисплей.

Известны исследования наработки твердосплавных инструментов в зависимости от свойств пород и режимов бурения [87, 90, 91, 96]. Но имеющиеся результаты исследований невозможно использовать для оценки работоспособности инструментов, оснащенных PDC, из-за особенности их износа и формирования площадки затупления на режущих кромках.

Разрушение горных пород тесно связано с двумя другими технологическими процессами: удалением продуктов разрушения породы из призабойной зоны и охлаждением рабочих элементов ПРИ. Перегрев PDC в микрообъемах поверхностных слоёв ведет к, термодеградации режущих элементов, при температурах выше 500–700°C и скорости резания в линии резания более 3 м/с, а несвоевременное удаление продуктов разрушения породы с забоя не только затрудняет взаимодействие ПРИ со свежей породой, снижая скорость бурения, но и приводит к дополнительному износу инструмента.

Передача энергии на породу забоя осуществляется через ПРИ, формируя при этом ствол скважины. Для бурения пород различной крепости созданы разнообразные типы буровых долот, отличающиеся как конструктивными параметрами, так и характеристиками материалов режущей части.

В практике бурения долотами с PDC внедрение резца в породу забоя осуществляется при вращении ПРИ, на сниженных значениях осевой нагрузки. После того как резец внедрен в породу, процесс движения резца рассматривается в горизонтальной плоскости, а осевая нагрузка может быть увеличена. В начальный период движения резца передняя грань врезается в породу, после чего в упруго-пластичных и хрупких породах происходит ее скол. В установившемся режиме работы резца порода разрушается последовательно в двух стадиях: смятие породы – скол.

При использовании PDC особое значение приобретает выбор схемы резания, от которого зависит нагруженность режущих элементов и энергоёмкость процесса разрушения породы.

В режущих инструментах для бурения скважин применяют три основных схемы резания (рис. 2.1), отличающиеся по энергоемкости:

– блокированная, наиболее энергоемкая, когда инструмент углубляется в породу, образуя борозду и перед ее выборкой имеется только одна поверхность обнажения (рис. 2.1, а).

– полублокированная, когда инструмент срезает уступ, образуя ступеньку с двумя поверхностями обнажения (рис. 2.1, б).

– свободная, когда инструмент срезает выступающую часть породы между двух поверхностей обнажения (рис. 2.1, в) [82].

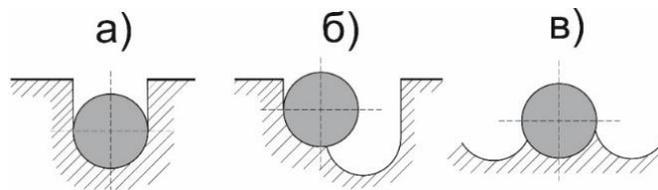


Рис. 2.1. Схемы резания и формы забоя:

а) блокированное резание; б) полублокированное резание; в) резание, со свободной поверхностью

При взаимодействии PDC с забоем скважины (см. рис. 2.1) режущие элементы воздействуют на забой с усилием P_y – осевая нагрузка на режущий элемент, P_z – сила резания, определяемые зависимостями [99, 104, 106]:

$$P_y = R_d \cdot F_{\text{зат}} - \frac{R_{\text{ск}} \cdot h \cdot z (\cos \delta - \mu_1 \cdot \sin \delta)}{2 \sin \tau \cdot \sin(\tau + \delta)}; \quad (2.1)$$

$$P_z = \mu_c \cdot R_d \cdot F_{\text{зат}} - \frac{R_{\text{ск}} \cdot h \cdot z (\sin \delta - \mu_1 \cdot \cos \delta)}{2 \sin \tau \cdot \sin(\tau + \delta)}; \quad (2.2)$$

где $F_{\text{зат}}$ – площадка затупления, мм²; h – толщина срезаемого слоя, мм; z – радиус установки режущего элемента, мм; δ° – угол резания, град; τ° – угол скалывания, град, μ_c – коэффициент, равный 0,35.

Экспериментальные исследования показали, что сопротивление породы дроблению R_d и скалыванию $R_{\text{ск}}$ пропорциональны контактной прочности породы $R_d = 0,24 P_k$ а $R_{\text{ск}}$ зависит от угла δ и равняется $R_{\text{ск}} = 0,06 P_k$ при $\delta < 90^\circ$; $R_{\text{ск}} = 0,07 P_k$ при $\delta = 90^\circ$ и $R_{\text{ск}} = 0,08 P_k$ при $\delta > 90^\circ$. Угол скалывания породы такжет зависит от угла резания δ° (рис. 2.2).

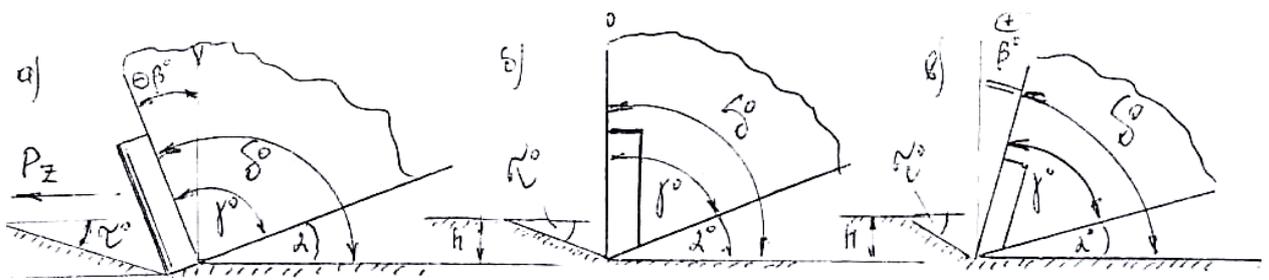


Рис. 2.2. Расчетная схема резания горной породы:

а) $\tau \approx 15^\circ$ при $\delta > 90^\circ$; б) $\tau \approx 20^\circ$ при $\delta = 90^\circ$; в) $\tau \approx 25^\circ$ при $\delta < 90^\circ$

Большое количество экспериментальных исследований отдельных авторов и опыт многих буровых компаний в области вращательного бурения скважин показывает, что эффективность отработки долот, армированных PDC, зависит не только от технологических режимов бурения, но и от методики их отработки.

Известно, что при бурении новым долотом и при оптимальном усилии подачи происходит процесс резания, то есть объемное разрушение горной породы. Но по мере затупления резцов PDC площадь контакта их с породой увеличивается, контактные напряжения в породе становятся меньше ее твердости на вдавливание, объемное разрушение переходит в усталостное, а затем в поверхностное, то есть идет процесс истирания. Избежать этого в значительной мере можно изменением параметров бурения, по мере затупления резцов PDC.

Одним из направлений сокращения сроков строительства скважин и повышения их экономической эффективности является создание новых высокопроизводительных породоразрушающих инструментов. Главной составляющей повышения эффективности бурения является оптимизация конструкций долот режуще-скалывающего действия, армированных алмазными пластинами PDC. Конечным результатом любой практической задачи является оптимизация того или иного процесса, конструкции, устройства и т.д. На экспериментальную проверку варианта исходных данных затрачивается большое количество времени, что в свою очередь влечет несоответствие реальных задач с научными исследованиями. По этой причине возникает задача выбора метода, который позволит оперативно, без больших материальных затрат, получить параметрические характеристики взаимодействия резца PDC с горной породой.

2.2. Исследование нормального износа режущих элементов буровых долот, армированных пластинами PDC

Износ резцов PDC зависит, прежде всего, от абразивности породы, геометрии рабочей части долота и режима бурения: усилия подачи, частоты вращения, интенсивности удаления продуктов разрушения. В соответствии с этим, чтобы повысить скорость бурения необходимо правильно подобрать тип долота, технологический режим бурения и соблюдать определенный порядок отработки долот.

Режим отработки долот включает в себя: время приработки нового долота, оптимизацию параметров режима бурения, в зависимости от свойств горных пород, и износа резцов, общую продолжительность работы долота в рейсе.

Уровень отработки долот, армированных PDC, оценивается с помощью технико-экономических показателей, к которым относятся: механическая скорость бурения (м/ч); величина проходки за рейс (м); количество метров, пробуренных одним долотом (м); стоимость 1 м пробуренной скважины (руб.)

Исследования последних лет показывают, что износ вооружения характеризуется истиранием, сколами и дроблением, которые являются основными недостатками долот PDC [36, 42, 58, 62].

В работах [61, 67] приводится, что долота PDC после отработки изнашиваются неравномерно – наиболее всего изнашиваются резцы по периферийной части из-за наибольших удельных мощностей трения, а наименее центральные. По опыту отработок износ в центральной части лопасти чаще всего отсутствует.

Одной из причин износа является неоптимальная силовая нагрузка отдельных участков рабочей поверхности, а также возникающие разрушительные вибрации [70, 71, 77, 78, 79, 81]. В связи с этим требуется другой подход по проектированию долот PDC, отличающийся от традиционного. Для этого необходимо оценить влияние физико-механических свойств горных пород на условия работы породоразрушающего инструмента. Для оценки влияния большое значение имеют стендовые исследования. Данные, полученные при исследовании, позволят с минимальными затратами оценить эффективность конструкции породоразрушающего элемента, а также наметить пути по их совершенствованию.

Как смоделировать и спрогнозировать износ резцов PDC и сегодня является вопросом актуальным. Наибольший износ буровые инструменты получают при проходке высокоабразивных пород крепких и средней крепости. Существующие методы оценки изнашиваемости PDC, основанные на изучении износа при резании блоков пород в лабораторных условиях для получения достоверных результатов, требуют значительных затрат времени и средств [10, 25, 38, 63]. Поэтому для ускорения процесса изнашивания PDC целесообразно выбрать такой материал, который удовлетворяет следующим требованиям: большая постоянная абразивность, постоянная твердость и малая трудоёмкость при проведении экспериментов.

Таким требованиям отвечают абразивные круги, выпускаемые для заточки режущего инструмента. Крепкие породы, абразивные круги и режущие пластины буровых инструментов имеют структурное подобие, у которых твердые зерна кремнезёма (SiO_2), карбида кремния (SiC), карбида вольфрама (WC) или алмаза (C_2) соединены между собой более мягким материалом, поэтому и разрушение их при взаимодействии подобны.

Рассматривая горные породы как изнашивающую среду, схематически можно представить себе два различных случая работы инструмента (рис. 2.3):

а) – порода 1 состоит из твердых зерен, имеющих средний диаметр d_3 , связанных между собой более мягким цементом и расположенных друг от друга на расстоянии $S_3 \geq d_3$.

К таким породам можно отнести песчаные сланцы, известняки с примесью кварцевых зерен, некоторые песчаники с базальным цементом и др. породы средней крепости.

б) – порода 1 состоит из твердых зерен, вплотную расположенных друг к другу и связанных цементом (рис. 2.3, б). Такими являются песчаники, граниты, кварциты и др. крепкие породы.

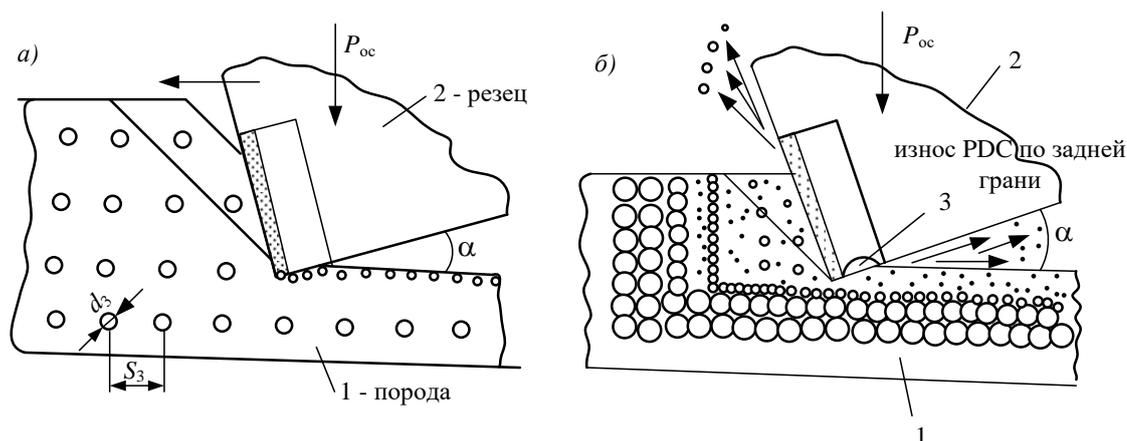


Рис. 2.3. Схема взаимодействия резца с породой при его изнашивании

В первом случае при движении резца 2 твердые зерна вдавливаются в цемент, который при этом разрушается и уплотняется. Сами твердые зерна, как правило, не разрушаются, а контактные давления на режущей кромке определяются сопротивлением цемента разрушению.

Во втором случае разрушение породы происходит путем дробления твердых зерен. Следовательно, контактные давления обусловлены прочностью твердых зерен и характером напряженного состояния при их разрушении. Очевидно, что каждая порода при разрушении характеризуется определенным сочетанием этих двух процессов [54]. Так, при резании крупнозернистого песчаника с большим содержанием кварца образуется большое количество мелких зерен, имеющих острые грани и активно взаимодействующих с контактной поверхностью PDC. При этом величина контактных давлений равна твердости кварцевых зерен, разрушение которых происходит в условиях объемного напряженного состояния.

Такая же картина как при резании крупнозернистого песчаника происходит и при взаимодействии режущей кромки PDC с абразивным кругом, но только вместо кварцевых зерен режущая кромка PDC будет взаимодействовать с более твердыми зернами из зеленого карбида кремния КЗ.

В настоящее время терминология в области износа и стойкости буровых инструментов, армированных PDC, полностью еще не установлена. Необходимо,

чтобы терминология по возможности отражала сущность физических процессов износа.

К основным, наиболее распространенным терминам относятся: изнашивание, износ и износостойкость.

Изнашивание – это процесс изменения размеров и геометрии инструмента, происходящий в результате уменьшения его объема под влиянием сил трения и связанных с ними физико-химических явлений.

Износ – результат изнашивания, оцениваемый по изменению размеров и формы инструмента либо других косвенных признаков.

Износостойкостью называют свойство буровых инструментов оказывать сопротивление изнашиванию. Единицами измерения износостойкости буровых инструментов принято считать объем выполненной им работы в метрах пробуренной скважины. Это отношение пути резания (за время наблюдения) к износу PDC по высоте.

Изменение формы и размеров инструмента в процессе изнашивания протекает различно в различных условиях. Поэтому для характеристики износа требуется несколько показателей: h – износ по высоте, измеренный по линии действия осевого усилия, мм; $F_{\text{зар}}$ – проекция площадки износа (затупления) на плоскость резания, мм²; $i_{(h)} = \frac{dh}{dL}$ – интенсивность изнашивания по высоте, мм/м.

Рассмотрим воздействие зерен породы (абразивного круга) на износ инструмента. Количество взаимодействий зерен с инструментом на единицу пути резания

$$n_3 = \frac{1}{d_3}. \quad (2.1)$$

При установившемся режиме резания, когда толщина срезаемого слоя также постоянна, износ инструмента по высоте на единицу пути можно охарактеризовать выражением

$$i_{(h)} = c \left(\frac{q}{H} \right)^b \cdot n_3, \quad (2.2)$$

где c – const, зависящая от формы зёрен и структуры инструментального материала;

q – удельное давление на контакте зерна с инструментом;

H – контактная твердость инструментального материала;

b – эмпирический коэффициент.

Подставляя значение n_3 в формулу (2.2), получим

$$i_{(h)} = c \left(\frac{q}{H} \right)^b \cdot \frac{c}{d_3}, \quad (2.3)$$

Число $\left(\frac{c}{d_3} \right)$ отражает влияние на интенсивность изнашивания числа твердых зерен породы. Как известно, свойством породы, отражающим влияние на износ этих факторов, есть абразивность.

Примем за показатель абразивности коэффициент абразивности, a , по Л.И. Барону и А.В. Кузнецову. Этот коэффициент учитывает влияние на изнашивающую способность не только твердых зерен, но и горной породы как агрегата. Тогда, исходя из идентичности физических процессов

$$\frac{c}{d_3} = k \cdot a, \quad (2.4)$$

где a – показатель абразивности; k – коэффициент пропорциональности, следовательно,

$$i_{(h)} = \frac{k \cdot a \cdot q^b}{H^b}. \quad (2.5)$$

Изнашиваемость инструмента зависит от абразивности горной породы (a) и от свойств инструментального материала (H^b) и от соотношения k . Для данной горной породы и инструментального материала величины H , b и k будут постоянными и можно записать

$$\omega = \frac{k}{H^b}, (const), \quad (2.6)$$

где ω – это коэффициент износа.

Тогда интенсивность изнашивания по высоте будет

$$i_{(h)} = \omega \cdot a \cdot q^b. \quad (2.7)$$

Выражение (2.7) представляет формулу износа в которой, a – это абразивные свойства породы (КЗ), q^b – зависит от механических свойств породы, конструкции и режима работы инструмента, ω – коэффициент износа характеризует изнашиваемость инструментального материала.

Удельное давление q^b на контакте зерна с инструментом, зависящее от механических свойств породы есть не что иное как твердость породы.

Примем за показатель твердости контактную прочность P_K по Л.И. Барону и Л.Б. Глатману. Этот показатель учитывает влияние на изнашивающую способность не только твердых зерен, но и горной породы как агрегата. Тогда, исходя из идентичности физических процессов

$$i_{(h)} = \omega \cdot a \cdot P_K. \quad (2.8)$$

Влияние свойств пород на интенсивность изнашивания при бурении и при резании должно быть сходным. Однако, при определении коэффициента износа при резании, измерения износа производили в осевой плоскости резца (по вертикали), а при бурении – в диаметральной плоскости на некотором расстоянии от периферии бурового инструмента. В соответствии с этим расчетная формула имеет вид

$$i_{(h)} = \omega_6 \cdot a \cdot P_K, \quad (2.9)$$

где ω_6 – коэффициент износа при бурении, определяется экспериментально как коэффициент линии регрессии зависимости площадки затупления $F_{зат}$ от пути резания $L_{рез}$ точки на мерном радиусе

$$F_{зат} = F_y + P_K \cdot a \cdot \omega_6 \cdot L_{рез}, \quad (2.10)$$

где F_y – условный износ, начальная ордината линии регрессии (для PDC диаметром $D = 13,5$ мм, $F_y = 1,25$ мм²).

Коэффициент износа при бурении для буровых инструментов, армированных твердым сплавом ВК8 принимается равным $\omega_6 = 1,3 \cdot 10^{-9}$ мм/мм, а для буровых инструментов, армированных стандартным PDC с 20 % кобальта $\omega_6 = 1,54 \cdot 10^{-11}$ мм/мм.

Прирост площадки затупления происходит от увеличения пути резания $L_{рез}$ при постоянных значениях горнотехнологических (P_k и a) и физико-технических характеристик породы и бурового инструмента.

1. При осмотре изношенных буровых инструментов расчет величины площадки затупления $F_{зат}$ исходя из износа PDC по высоте (см. рис. 2.5) делают по формуле

$$F_{зат} = F \cdot B, \text{ мм}^2,$$

где F – толщина алмазного слоя, мм;

$B = 2\sqrt{2Rh - h^2}$, мм – длина режущей части алмазного слоя;

$R = 6,75$ мм – радиус PDC;

h – износ PDC по высоте, мм

При установившемся режиме работы бурового инструмента алмазный слой вдавливаются в породу и часть площади твердосплавной подложки по задней грани входит в контакт с поверхностью забоя скважины. А так как износостойкость вольфрамкобальтовой подложки в 50–100 раз меньше износостойкости алмазного слоя [1, 9, 17], то даже при относительно слабом воздействии вылетающих частиц породы с энергией на задней грани режущих элементов образуется лунка, обеспечивающая формирование заднего угла α (α – угол наклона задней поверхности к плоскости резания)

$$W = 0,5mV^2 \cos\alpha, \quad (2.11)$$

где m – масса выброшенной породы в подрезцовой зоне;

V – скорость резания, м/с;

α – задний угол, град.

Зная $i_{h(t)}^n$ интенсивность износа по высоте на породе и допустимый износ бурового инструмента по диаметру, определяют время возможной работы инструмента по формуле

$$t = \frac{\Delta D}{2 \cdot i_{h(t)}^n}; \text{ (мин)}$$

где $\Delta D = 2h$, мм – допустимый износ бурового инструмента по диаметру;

h – износ PDC по высоте, мм.

Максимальное значение площадки затупления одного режущего элемента (PDC) определяют по формуле

$$F_{\text{зат}} = F \cdot B = F \cdot 2\sqrt{2Rh - h^2}, \text{ мм}^2$$

где F – толщина алмазного слоя PDC, мм;

B – длина площади затупления, рассчитывается исходя из износа по высоте h , мм

Для практических расчетов важно знать интенсивность износа PDC по высоте во времени с учетом рационального режима работы инструмента, а именно с учетом скорости резания $V_{\text{рез}} \leq V_{\text{рез}}^{\text{кр}}$.

В соответствии с этим расчетная формула примет вид

$$i_{h(t)} = P_k \cdot a \cdot \omega \cdot V_{\text{рез}}, \text{ мм/мм} \quad (2.12)$$

где $V_{\text{рез}} = 10^{-3} \cdot \pi D n \leq V_{\text{рез}}^{\text{кр}}$, м/мин;

D – диаметр бурового инструмента, мм;

n – частота вращения бурового инструмента, об/мин;

10^{-3} – переводной коэффициент, мм в м;

$V_{\text{рез}}^{\text{кр}}$ – критическая скорость резания, при которой начинается тепловой катастрофический износ PDC по высоте.

Критическое значение контактной температуры на режущих кромках PDC и ВК6, определяемое измерением искрового потока (фототока) составляет для PDC $T_{\text{кр}} \approx 1200^\circ\text{C}$. Для ВК6 – 700°C , плюс исследование зависимости критических скоростей резания от контактной прочности породы позволяет выразить критическую скорость резания $V_{\text{рез}}^{\text{кр}}$ через контактную прочность P_k и контактную температуру $T_{\text{кр}}^\circ\text{C}$ на режущих кромках PDC

$$V_{\text{рез}}^{\text{кр}} = C \frac{T_{\text{кр}}}{P_k}; \text{ м/с} \quad (2.13)$$

где $C = \text{const}$, зависящая от формы зерен и структуры инструментального материала.

На рис. 2.4 представлены зависимости критических скоростей резания $V_{рез}^{кр}$ от контактной прочности породы P_k , полученные при бурении пород с $P_k = 1780$ МПа, 1270 МПа, 960 МПа, 650 МПа, долотами, армированными PDC и ВК6.

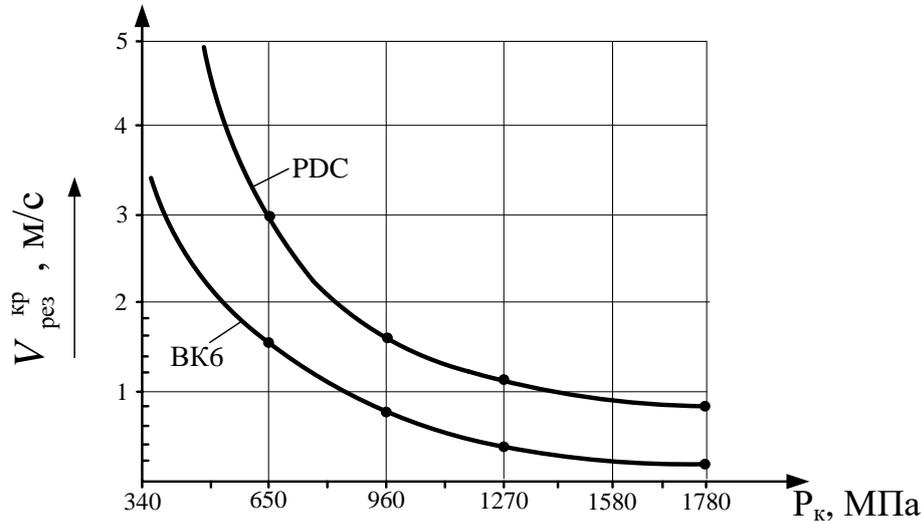


Рис. 2.4. Зависимость критических скоростей резания резцами PDC и ВК6 при бурении пород с различной контактной прочностью

Затем составляется регламент бурения с циклическим увеличением осевой нагрузки $P_{ос}$ на каждом интервале:

- забуривание;
- приработка нового инструмента;
- наращивание нагрузки по мере увеличения $F_{зат}$;
- наращивание $P_{ос}$ нагрузки до предельного значения.

При определении наработки бурового инструмента основным условием является выбор режима, при котором $P_{уд}$ всегда больше P_k (режим объемного разрушения), где $P_{уд} = \frac{P_{ос}}{F_{зат}}$.

Рассчитывая скорость бурения на каждом интервале

$$V_{мб} = V_0 \frac{P_{уд}}{P_k}, \text{ мм/с (м/час)}$$

где $V_0 = \frac{4270}{P_k}$, мм/с – модуль скорости [55] – это механическая скорость бурения, когда $P_{уд} = P_k$, затем определяют среднюю скорость бурения $V_{мб}^{ср}$ за время t .

Тогда наработка L бурового инструмента определяется выражением $L = V_{\text{мб}}^{\text{сп}} \cdot t$, м.

Установить адекватность теоретических основ процесса изнашивания реальному изнашиванию PDC на породах не представляется возможным из-за большого объема бурения пород в лабораторных условиях. Поэтому нами был разработан метод ускоренного определения интенсивности изнашивания PDC по высоте во времени.

Метод определения $i_{h(t)}$ в лабораторных условиях заключается в следующем. На основании структурного подобия крепких абразивных пород и абразивных кругов заточных станков для буровых инструментов было принято решение исследовать процесс изнашивания PDC на специальном стенде в лабораторных условиях.

Таким образом, представленные в разделе теоретические основы процесса формирования нормального и аномального износа PDC дают возможность разработки и исследования принципиально нового типа буровых инструментов, а именно двухъярусных антивибрационных долот.

Известно, что при резании горных пород долотами PDC, режущие элементы самозатачиваются, т.е. в процессе разрушения породы на забое происходит изнашивание по высоте, и при этом формируется задний угол. Поскольку передняя грань PDC это алмазный слой, а задняя – вольфрамокобальтовый сплав, а их относительные износостойкости отличаются в 95–100 раз [28, 29], то интенсивность изнашивания по передней и задней грани не одинакова. Повышенный износ по задней грани способствует формированию заднего угла α при изменяемой по величине площадке затупления, которая зависит от ширины режущей части F и длины B [85].

$$F_{\text{зат}} = \alpha(F \cdot B), \text{ мм}^2 \quad (2.14)$$

На рис. 2.5 показана схема к определению износа по высоте и прироста площадки затупления PDC круглой цилиндрической формы.

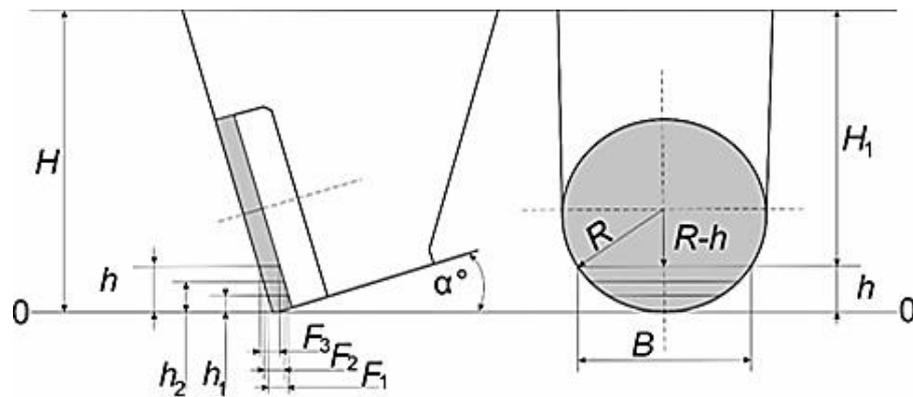


Рис. 2.5. Схема прироста площадки затупления:

h – износ по высоте; $F_1 \approx F_2 \approx F_3$ – ширина режущей части алмазного слоя; B – длина режущей части алмазного слоя; 0–0 плоскость резания

Размер F принимаем равным толщине алмазного слоя, а размер B рассчитываем исходя из износа по высоте h , по формуле:

$$B = 2\sqrt{R^2 - (R - h)^2}, \text{ мм}^2 \quad (2.15)$$

где $R = 6,75$ мм – радиус PDC.

Исследование износостойкости проводили на установке для ускоренного испытания материалов (УИМ-2) с горизонтальной осью вращения. Базой установки принят настольный горизонтально-фрезерный станок НГФ-110Ш4, к которому пристроено нагрузочное приспособление. На рис 2.6 представлена схема установки УИМ-2.

В корпусе нагрузочного приспособления расположен шпиндель с пинолью и механизмом подачи, в виде реечной пары. Испытываемый образец 4 закрепляется в державке 3 нагрузочного приспособления. Образцы истираются по образующей поверхности абразивного круга 5 (исследования проводились на кругах ПП 300×35×127 6377К3 40СМ1 производства Волжского абразивного завода, с паспортизированными показателями твердости). Приводится абразивный круг во вращение от электродвигателя 1 через редуктор 2, с частотой вращения 50 об/мин. Для измерения пути трения предусмотрен счётчик пути 6.

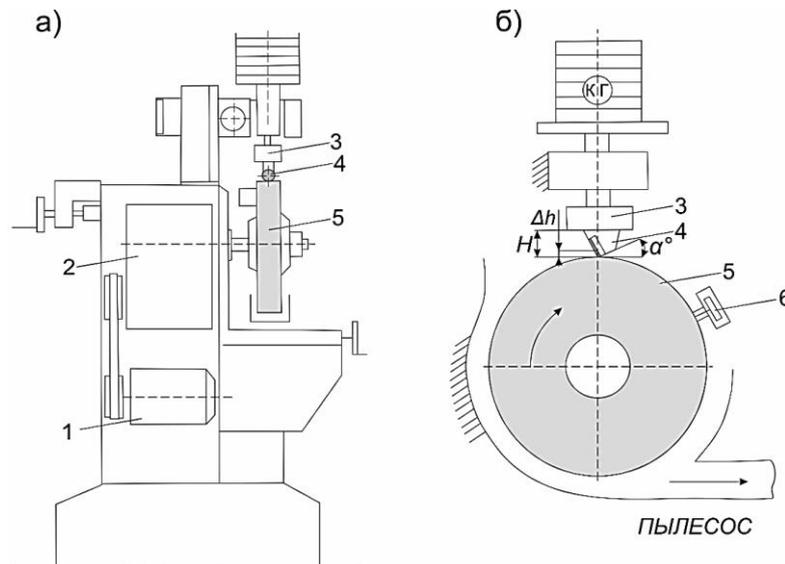


Рис. 2.6. Установка для ускоренных испытаний материалов УИМ-2:
а) схема установки; б) схема блока нагружения и истирания PDC

В процессе эксперимента выполнялись следующие условия: давление на режущих кромках изнашиваемого образца не должно превышать 18 МПа – из условий твердости круга. Скорость истирания не должна превышать 2,24 м/с из условий работы режущих кромок долота диаметром 215,9 мм и путь трения при изнашивании должен быть не более 942 м – из условий 20 мин работы УИМ-2.

Износ по высоте (h , мм) определяли микрометром, с точностью до 0,01 мм.

Эксперимент проводили в такой последовательности:

1. Измеряли микрометром высоту H заготовки режущей части долота, армированной PDC ($H=35,01$ мм).

2. Определяли массу установочной части без гирь с заготовкой режущей части на весах M-ER 326 AFL-32,5 с АКБ с цифровой индикацией и пределом взвешивания 32 кг ($M = 1200$ г).

3. Определяли начальную площадку затупления. За счет фаски на пластине PDC, условная начальная площадка затупления (при $\Delta h = 0,05$ мм) принимается равной $1,25 \text{ мм}^2$ ($F_{\text{зат}}^H = 1,25 \text{ мм}^2$)

4. При допустимой удельной нагрузке на абразивный круг ($P_{\text{уд}}=18$ МПа), определяли начальную осевую нагрузку на PDC

$$P_{\text{ос}}^1 = P_{\text{уд}} \cdot F_{\text{зат}}^1 = 18 \cdot 1,25 = 22,5 \text{ Н.} \quad (2.16)$$

5. Определяли путь трения $L_{\text{тр}}$ за время t равное 20 минутам при частоте вращения абразивного круга $n = 50$ об/мин и диаметре абразивного круга $D_{\text{АК}} = 0,3$ м.

$$L_{\text{тр}}^{\text{АК}} = \pi \cdot D_{\text{АК}} \cdot n \cdot t = \pi \cdot 300 \cdot 50 \cdot 20 = 942 \text{ м.} \quad (2.17)$$

6. Измеряли микрометром высоту H_1 после истирания и определяли износ по высоте Δh , мм

$$\Delta h = H - H_1 = 35,01 - 34,89 = 0,12 \text{ мм,} \quad (2.18)$$

где $H_1 = 34,89$ м – высота образца после истирания.

7. Определяли новое значение площадки затупления.

$$F_{\text{зат}} = \alpha(F \cdot B) = 1 \cdot 2 \sqrt{6,75 \cdot 2 \cdot 0,12 - 0,01} = 2,83 \text{ мм}^2. \quad (2.19)$$

8. Определяли конечное и среднее значение удельной нагрузки на PDC в процессе эксперимента.

$$P_{\text{уд}}^{\text{к}} = \frac{P_{\text{ос}}^1}{F_{\text{зат}}} = \frac{22,5}{2,83} = 8 \text{ МПа} - \text{конечное значение удельной нагрузки.} \quad (2.20)$$

$$P_{\text{уд}}^{\text{ср}} = \frac{P_{\text{уд}}^{\text{н}} + P_{\text{уд}}^{\text{к}}}{2} = \frac{18 + 8}{2} = 13 \text{ МПа} - \text{среднее значение удельной нагрузки.} \quad (2.21)$$

9. Определяли интенсивность износа PDC на абразивном круге (АК) по высоте во времени:

$$i_{h(L)}^{\text{АК}} = \frac{\Delta h_1}{L_{\text{тр}}} = \frac{0,12}{942} = 0,127 \cdot 10^{-3} \text{ мм/м} \quad (2.22)$$

При продолжительности опыта $t = 20$ мин, при частоте вращения абразивного круга $n = 50$ об/мин путь трения при начальной удельной нагрузке $P_{\text{уд}} = 18$ МПа составляет:

$$L_{\text{тр}} = \pi \cdot D_{\text{АК}} \cdot n \cdot t = \pi \cdot 300 \cdot 50 \cdot 20 = 942 \text{ м.} \quad (2.23)$$

10. Повторно устанавливали образец на УИМ-2.

11. Зная площадку затупления $F_{\text{зат}}^2$ определяли начальную осевую нагрузку второго эксперимента

$$P_{\text{ос}}^2 = P_{\text{уд}} \cdot F_{\text{зат}}^2 = 18 \cdot 2,83 = 51 \text{ Н.} \quad (2.24)$$

Программу всех замеров повторяли. Результаты замеров до замены абразивного круга представлены в табл. 2.1.

Среднее значение интенсивности изнашивания по высоте на абразивном

круге по семи замерам составляет $i_{h(L)}^{AK} = 0,107 \cdot 10^{-3}$ мм/м при коэффициенте вариации $K_{\text{вар}} = 10,8$ % (табл. 1).

В лабораторных условиях исследовать износостойкость PDC на горных породах нет никакой возможности из-за значительных объемов эксперимента, поэтому сравнение результатов исследований износостойкости на абразивных кругах УИМ-2, и на породе проведены косвенным методом по результатам износа инструмента с PDC при бурении скважины глубиной 85,2 м за время 3 часа 50 минут.

Таблица 2.1

Результаты замеров до замены абразивного круга

№ п/п	Параметр	Номер опыта						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Начальная удельная нагрузка $P_{\text{уд}}^{\text{нач}}$, МПа	18	18	18	18	18	18	18
2	Начальная осевая нагрузка $P_{\text{ос}}^{\text{нач}}$, Н	22,5	51,0	65,5	77,2	87,3	96,1	104
3	Начальная площадка затупления $F_{\text{зат}}^{\text{нач}}$, мм ²	1,25	2,83	3,64	4,29	4,85	5,34	5,78
4	Время эксперимента t , мин	20	20	20	20	20	20	20
5	Размер образца по высоте после истирания H_1 , мм	34,89	34,78	34,67	34,57	34,48	34,39	34,30
6	Износ образца по высоте Δh , мм	0,12	0,11	0,105	0,1	0,095	0,092	0,09
7	Конечная площадка затупления $F_{\text{зат}}^{\text{кон}}$, мм ²	2,83	3,64	4,29	4,85	5,34	5,78	6,18
8	Конечное значение удельной нагрузки $P_{\text{уд}}^{\text{кон}}$, МПа	8	14	15,3	15,9	16,35	16,63	16,83
9	Среднее значение удельной нагрузки $P_{\text{уд}}^{\text{ср}}$, МПа	13	16	16,6	16,9	17,2	17,3	17,4
10	Интенсивность износа по высоте $i_{h(L)} \cdot 10^{-3}$ мм/м	0,127	0,116	0,111	0,106	0,100	0,095	0,095

Тогда за весь период испытаний (7 замеров до замены круга) общий путь трения с учетом уменьшения диаметра абразивного круга составил $\sum_1^7 L_{\text{тр}}^{AK} = 6500$ м, а износ PDC по высоте составил $\Delta h = 0,7$ мм. Такой износ пластин PDC произошел при бурении скважины глубиной 85,2 метра долотом

диаметром $d=0,112$ м при частоте вращения $n=250$ об/мин через $t = 3,8$ часа (230 минут). При этом путь трения (резания) по породе режущим элементом составил:

$$L_{\text{тр}} = \pi \cdot d \cdot n \cdot t = 3,14 \cdot 0,112 \cdot 250 \cdot 230 \approx 20220 \text{ м.} \quad (2.25)$$

Износостойкость режущих элементов (I_{PDC}) определяется как отношение износа пластин PDC по высоте к пути резания за время эксперимента. Тогда износостойкость пластин PDC при испытании на абразивном круге будет:

$$I_{PDC}^{AK} = \frac{\Delta h_{PDC}^{AK}}{\sum_1^7 L_{\text{тр}}^{AK}} = \frac{0,7}{6500} = 0,107 \cdot 10^{-3} \text{ мм/м,} \quad (2.26)$$

где $\sum_1^7 L_{\text{тр}}^{AK}$ – путь истирания пластин PDC на абразивном круге за всё время эксперимента; $\Delta h_{PDC}^{AK} = 0,7$ мм – суммарный износ пластин PDC по высоте.

Износостойкость пластин PDC на породе это отношение износа пластин PDC по высоте Δh_{PDC}^{Π} к пути резания $L_{\text{рез}}^{\Pi}$ за время наблюдения:

$$I_{PDC}^{\Pi} = \frac{\Delta h_{PDC}^{\Pi}}{L_{\text{рез}}^{\Pi}} = \frac{0,7}{20220} = 0,035 \cdot 10^{-3} \text{ мм/м,} \quad (2.27)$$

Видим, что износостойкость пластин PDC на породе в 3 раза больше чем на абразивном круге.

Для практических расчетов важно знать интенсивность износа PDC по высоте от пути трения по горной породе:

$$i_{h(L)PDC}^{\Pi} = i_{h(L)PDC}^{AK} \cdot \left(\frac{a_{\Pi}}{a_{AK}} \right)^{0,3}, \frac{\text{мм}}{\text{м}}; \quad (2.28)$$

где a_{Π} – абразивность породы, мг; a_{AK} – абразивность круга, мг.

Зная $i_{h(L)PDC}^{\Pi}$ и допустимый износ бурового инструмента по диаметру $\Delta D = 2h$, определяют время $t_{\text{Нап}}$ работы инструмента по формуле:

$$t_{\text{Нап}} = \frac{\Delta D}{2 \cdot \pi \cdot d \cdot n \cdot i_{h(L)PDC}^{\Pi}}, \text{ мин} \quad (2.29)$$

где d – диаметр долота, м; n – частота вращения долота, об/мин.

Максимальное значение площадки затупления одного режущего элемента зависит от толщины режущей алмазной части F , ее ширины B_{max} , при максимальном допустимом износе по высоте Δh_{max} для пластины PDC радиусом 6,75 мм и определяется по формуле:

$$F_{\text{зат}}^{\text{max}} = F \cdot B_{\text{max}} = F_{\text{max}} \cdot 2\sqrt{2R\Delta h_{\text{max}} - \Delta h_{\text{max}}^2}, \text{ мм}^2 \quad (2.30)$$

где F – толщина алмазного слоя PDC, мм;

B – рассчитывается исходя из износа по высоте h , мм.

Затем составляется регламент бурения с циклическим увеличением осевой нагрузки $P_{\text{ос}}$ на каждом интервале:

- забуривание;
- приработка нового инструмента;
- наращивание нагрузки по мере увеличения $F_{\text{зат}}$;
- наращивание $P_{\text{ос}}$ нагрузки до предельного значения.

Усилия резаний и необходимые значения крутящих моментов зависят от толщины срезаемого слоя породы. Толщина срезаемого слоя породы зависит от свойств породы, конструкции долота и режимных параметров процесса бурения

$$h = \frac{V_{\text{мб}}}{n \cdot z}, \text{ мм} \quad (2.31)$$

где n – частота вращения долота, об/мин, z – количество режущих пластин PDC в линии резания, $V_{\text{мб}} = V_0 \frac{P_{\text{уд}}}{P_{\text{к}}}$, мм/с механическая скорость бурения, V_0 – модуль скорости бурения, мм/с, $P_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{ос}}}{P_{\text{зат}}}$, МПа – удельная нагрузка на режущих кромках долота, $P_{\text{ос}}$ – осевая нагрузка, кН, $F_{\text{зат}}$ – площадка затупления режущих пластин PDC, мм², тогда:

$$V_{\text{мб}} = \frac{V_{\text{с}} \cdot P_{\text{ос}}}{P_{\text{к}} \cdot F_{\text{зат}}}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}. \quad (2.32)$$

Подставляя значение $V_{\text{мб}}$ в формулу (2.31), получим:

$$h = \frac{V_0 \cdot P_{\text{ос}} \cdot 60}{n \cdot z \cdot P_{\text{к}} \cdot F_{\text{зат}}}, \text{ мм} \quad (2.33)$$

или, для требуемого значения толщины срезаемого слоя породы необходимая осевая нагрузка определяется по формуле:

$$P_{\text{ос}} = \frac{h \cdot n \cdot z \cdot P_{\text{к}} \cdot F_{\text{зат}}}{V_0 \cdot 60}, \text{ кН}. \quad (2.34)$$

Зная h , усилие резания при бурении определяют по формуле:

$$P_z = \mu_c \cdot R_d \cdot F_{\text{зат}} + \frac{R_{\text{ск}} \cdot h \cdot B(\sin\delta + \mu_1 \cdot \cos\delta)}{2\sin\tau \cdot \sin(\tau + \delta)}, \text{ кН}$$

где $R_d = 0,24 \cdot P_k$ – сопротивление породы дроблению; $R_{\text{ск}} = 0,08 \cdot P_k$ – сопротивление породы скалыванию; $\mu_c = 0,35$ – коэффициент трения при дроблении; $\mu_1 = 0,4$ – коэффициент трения при скалывании; $\tau = 25^\circ$ – угол скалывания пород; $\delta = 105^\circ$ – угол резания (при $\beta = -15^\circ$ – передний угол); $B = 2 \cdot \sqrt{R^2 - (R - h)^2}$, мм – ширина срезаемого слоя породы при толщине слоя h (мм); $R = 6,75$ мм радиус круглой пластины PDC.

Тогда крутящий момент на забуривающем ярусе будет

$$M_{\text{кр}}^{\text{разбур}} = \sum_1^n (P_{z1}^P \cdot 2_1^P \cdot z_1^P \cdot P_{z2}^P \cdot 2_2^P \cdot z_2^P + \dots + P_{zn}^P \cdot 2_n^P \cdot z_n^P), \text{ кНм}, \quad (2.35)$$

где $P_{z1}^P \cdot 2_1^P \cdot z_1^P$ – это соответственно усилие резания, радиус установки и количества пластин PDC в первой линии резания на разбуривающем ярусе.

$$M_{\text{кр}}^{\text{забур}} = \sum_1^n (P_{z1}^3 \cdot 2_1^3 \cdot z_1^3 \cdot P_{z2}^3 \cdot 2_2^3 \cdot z_2^3 + \dots + P_{zn}^3 \cdot 2_n^3 \cdot z_n^3), \text{ кНм}; \quad (2.36)$$

где $P_{z1}^3 \cdot 2_1^3 \cdot z_1^3$ – это соответственно усилие резания, радиус установки и количество пластин PDC в первой линии резания на забуривающем ярусе.

Результирующий крутящий момент на долоте:

$$M_d = M_{\text{кр}}^{\text{забур}} - M_{\text{кр}}^{\text{разбур}}. \quad (2.37)$$

Приближая по модулю значения крутящих моментов на забуривающем и разбуривающем ярусах можно предупредить возникновение крутильных колебаний на буровом стае и уменьшить количество аномально изношенных пластин PDC от ударов, возникающих при крутильных колебаниях.

При взаимодействии пластин PDC с забоем скважины режущие элементы воздействуют на забой с усилием P_y равным

$$P_y = R_d \cdot F_{\text{зат}} - \frac{R_{\text{ск}} \cdot h \cdot z(\cos\delta - \mu_1 \cdot \sin\delta)}{2\sin\tau \cdot \sin(\tau + \delta)}, \quad (2.38)$$

где $F_{\text{зат}}$ – площадка затупления, мм²; h – толщина срезаемого слоя, мм; z – радиус установки режущего элемента, мм; δ° – угол резания, град; τ° – угол скалывания,

град.

При определении наработки породоразрушающего инструмента (ПРИ) основным условием является выбор режима, при котором $P_{уд}$ всегда больше P_k

(режим объемного разрушения), где $P_{уд} = \frac{P_{ос}}{F_{зат}}$. (2.39)

Рассчитывая скорость бурения на каждом интервале определяют среднюю скорость бурения за время t , по формуле:

$$V_{мб} = V_0 \cdot \frac{P_{уд}}{P_k}, \text{ мм/с.} \quad (2.40)$$

Тогда наработка L долота определяется выражением:

$$L = V_{мб}^{ср} \cdot t, \text{ м.} \quad (2.41)$$

Таким образом, ускоренные лабораторные исследования износостойкости PDC на абразивном круге УИМ-2, позволяют установить интенсивность износа PDC по высоте во времени, что в свою очередь дает возможность производить расчеты механической скорости бурения и наработки инструмента.

2.3. Исследование аномального износа режущих элементов буровых долот, армированных пластинами PDC

На каждом из отработанных долот количество нормально и аномально изношенных режущих элементов примерно одинаково. Анализ состояния отработанных долот показывает, что аномальный износ пластин PDC имеет преимущественно два вида: а – сколы от действия сил со стороны передней грани, б – сколы от действия сил со стороны задней грани, так же возможен отрыв всей пластины PDC – в.

На рис. 2.7 слева на право показаны основные виды аномального износа.

Прочностные характеристики режущих элементов значительно превышают прочностные характеристики буримых пород. Так у твердосплавной основы PDC твердость 86–91 HRA, прочность на изгиб 1000–1800 МПа, ударная вязкость 2–7 Дж/см², модуль упругости $6 \cdot 10^5$ МПа, у алмазного слоя предел прочности при сжатии 2000 МПа [30, 31]. Следовательно, аномальный износ может происходить только от действия ударных нагрузок.

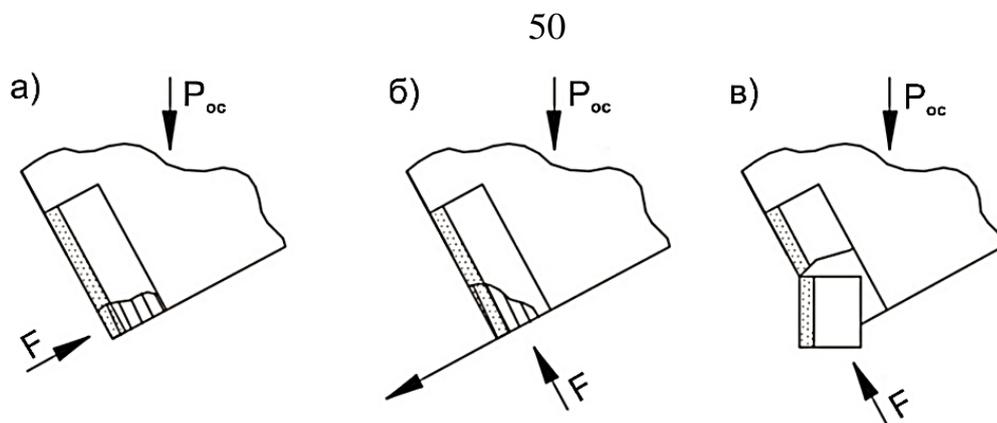


Рис. 2.7. Виды аномального износа пластин PDC

На рис. 2.8 изображены фрагменты долота с нормально и аномально изношенными PDC.

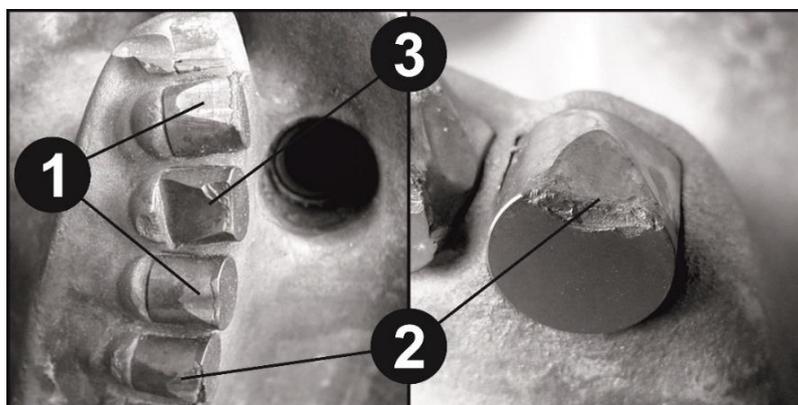


Рис. 2.8. Фрагменты долота с нормально и аномально изношенными PDC:

1 – нормальный износ PDC; 2 – скол PDC от действия сил по передней грани (аномальный износ); 3 – скол PDC от действия сил по задней грани (аномальный износ)

Изменения по величине сил резания и крутящего момента на долоте приводит к возникновению крутильных колебаний на буровом стае.

Исследованиями [69] проводимыми при бурении скважин глубиной 1800м бурильной колонной из труб $\varnothing 127$ мм долотом БИТ2 $\varnothing 214$ мм при крутящем моменте на долоте 9 кН·м и частоте 120 об/мин установили, что буровой став закручивается на 5,6 оборота, а при уменьшении крутящего момента до 6 кН·м раскручивается на два оборота. Такое изменение углов закручивания бурового става запускает процесс крутильных автоколебаний. Их период T – определяемый по формуле 2.42, составит 3 секунды, а число колебаний ν определяемое по формуле 2.43, будет равно 20 колеб/мин.

$$T = \frac{4l}{\lambda}, \text{сек} \quad (2.42)$$

$$v = \frac{15\lambda}{l}, \text{колеб/мин} \quad (2.43)$$

где $\lambda = 2465$ м/с – скорость распространения крутильных возмущений; $l = 1800$ м длина бурильной колонны. Это значит, что каждые 3 секунды на долото будет воздействовать один ударный импульс от автоколебаний. На рис. 2.9 показана зависимость угловой скорости долота от угловой скорости привода (ВЗД) и крутильных автоколебаний бурильной колонны.

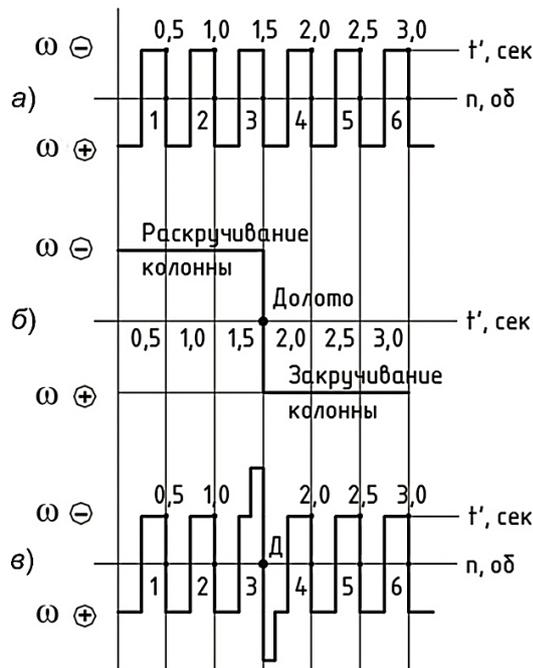


Рис. 2.9. Зависимость угловой скорости долота от угловой скорости привода

ВЗД и крутильных автоколебаний бурильной колонны:

- а) угловая скорость долота от ВЗД; б) угловая скорость крутильных автоколебаний бурильной колонны; в) суммарная угловая скорость долота от ВЗД и крутильных автоколебаний

Проходя через ВЗД, переводник и долото скорость распространения волны уменьшается на порядок до значений $V = 245$ м/с. Такой импульс скорости воздействует на долото в течении $t \approx 0,005$ с. За это время при частоте вращения $n = 120$ об/мин режущий элемент на $\varnothing 215,9$ мм проходит путь $S = 6,75$ мм со средней скоростью $V_{рез} = 1,35$ м/с, а на $\varnothing 100$ мм $S = 3,14$ мм.

При прохождении крутильной волны через долото происходит резкое увеличение энергии, передаваемое резцом в породу, определяемое по формуле:

$$\omega = P_z \cdot V_1, \text{ Дж/мс} \quad (2.44)$$

где P_z – усилие резания, Н; V_1 – скорость резания, м/с.

При резком возрастании скорости резания в 180 раз (с 1,35 до 245 м/с), на пути $S = 6,75$ мм не происходит разрушения породы в виде мелких и крупных сколов. Зерна породы дробятся и спрессовываются, образуя ядро уплотнения. При бурении в обычном режиме с толщиной срезаемой стружки 1,5–2 мм, средняя длина крупного скола по данным $l_{\text{СК}} \approx 5,07$ мм с коэффициентом вариации $K_B = 0,35$ – $0,20$ – на песчанике, с $K_B = 0,4$ – $0,35$ – на известняке, $K_B = 0,24$ – $0,198$ – на мраморе.

Схема формирования скола представлена на рис. 2.10.

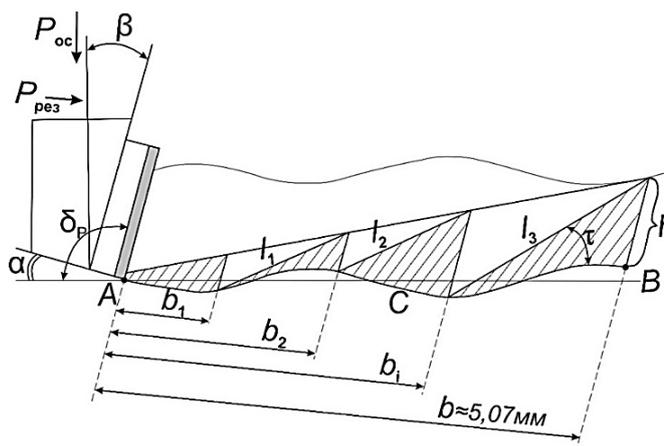


Рис. 2.10. Расчетная схема разрушения горной породы режущим элементом

долота: $P_{\text{ос}}$ и $P_{\text{рез}}$ – направление действия осевой нагрузки и силы резания; $h = 2$ мм – текущая величина толщины срезаемого слоя породы; b_i и l_i – размеры участков дробления и скола; τ – угол скола i -го элемента; β – передний угол; δ_p – угол резания; α – задний угол; A и B – точки начала и конца крупного скола; A, B, C – точки возможного положения режущей кромки PDC при воздействии на нее импульса скорости от крутильной волны

В момент формирования ударного импульса на режущем элементе от крутильной волны PDC может находиться в начале, середине или в конце участка дробления и скола породы. Длина скола b_i и длина пути $SPDC$ за время импульса ($t \approx 0,005$ с) соизмеримы. Если в момент формирования импульса PDC находится в начале участка дробления и скола породы, то из-за нехватки

материала ядро уплотнения не формируется. Если же в момент формирования импульса PDC находится в конце участка дробления и скола, то ядро формируется в полном объеме и производит на PDC ударный импульс. За время t энергия удара гасится при формировании ядра уплотнения и на PDC воздействует неупругий удар, определяемый по формуле 2.45:

$$E = \frac{\omega}{t}, \text{ Дж} \quad (2.45)$$

где ω – энергия, передаваемая в породу Дж/мс.

Вероятность такого события определяется по формуле Байеса. Пусть событие В-ударный импульс, происходит с одним из сколов несовместных событий: A_1, A_2, A_3 , где A_1 – встреча импульса с началом скола (рис. 2.10, точка А), A_2 – встреча импульса с серединой скола (рис. 2.10, точка С), A_3 – встреча импульса с окончанием скола (рис. 2.10, точка В).

При толщине срезаемого слоя породы $h = 1,5\text{--}2$ мм среднее значение длины скола $v = 5,07$ мм [6], тогда вероятность события:

$$P(A_1) = \frac{1}{5} = 0,2; \quad P(A_2) = \frac{3}{5} = 0,6; \quad P(A_3) = \frac{1}{5} = 0,2.$$

Вероятность события $P(B/A_1) = 0,8; P(B/A_2) = 0,9; P(B/A_3) = 0,85$.

Тогда по формуле полной вероятности встречи импульса со сколом

$$P(B) = P(B/A_1) \cdot P(A_1) + P(B/A_2) \cdot P(A_2) + P(B/A_3) \cdot P(A_3) = 0,87.$$

По формуле Байеса находим вероятность возникновения ударного импульса в зоне точки В (см. рис. 2.10):

$$P(A_3/B) = \frac{P(A_3) \cdot P(B/A_3)}{P(B)} = \frac{0,2 \cdot 0,85}{0,87} = 0,19; \quad P(A_3/B) \leq 0,2. \quad (2.46)$$

И хотя вероятность встречи импульса с началом крупного скола (формирование ядра уплотнения крупного фрагмента срезаемой породы) не высока, и составляет менее 20 %, число аномально изношенных пластин PDC на отработанных долотах и нормально изношенных PDC примерно одинаково.

При работе долота на режущий элемент воздействует осевая нагрузка (сжатие), сила резания (сдвиг) и удар. Сопротивление воздействию этих сил обозначим d_u и назовем ударной вязкостью со сжатием

$$d_u = \frac{E}{S}, \text{ Дж/см}^2, \quad (2.47)$$

где S – площадь скола PDC, см².

В лаборатории воспроизводится та часть энергии удара, которая воздействует на PDC в конце импульса, когда уже сформировалось ядро уплотнения. Исследовали возникновение аномального износа режущих пластин PDC при бурении крепких известняков с $P_k = 960$ МПа и абразивностью $a = 18$ мг. Моделировали бурение с толщиной срезаемого слоя породы h (1,0; 1,2; 1,5; 2,0) мм. По известной [6] методике, зная горно-технологические характеристики породы, определяли для каждого значения h , осевую нагрузку P_{oc} и усилие резания P_z .

$$P_{oc} = \frac{P_k \cdot F_{зат} \cdot h \cdot n \cdot Z}{V_0 \cdot 60}, \text{ кН} \quad (2.48)$$

где P_k – контактная прочность, МПа; $F_{зат}$ – начальная площадка затупления, мм²; h – толщина срезаемого слоя породы, мм; n – частота вращения долота, об/мин; Z – число режущих элементов в линии резания; V_0 – модуль скорости бурения, мм/с.

Усилие резания по данным [7] при бурении крепких пород находится в пределе $P_z = (0,25-0,3) P_{oc}$.

Исследования проводили на стенде, оборудованном на базе гидравлического пресса и копра радиусом $R_k = 1$ м.

На рис. 2.11 представлена схема испытательного стенда на базе гидравлического пресса.

Рассчитанные значения осевой нагрузки P_{oc} и усилия резания P_z для каждого $h_{мм}$, а так же энергии удара и вес гири копра G (кг) и полученные результаты исследования аномального износа режущих элементов PDC представлены в табл. 2.2.

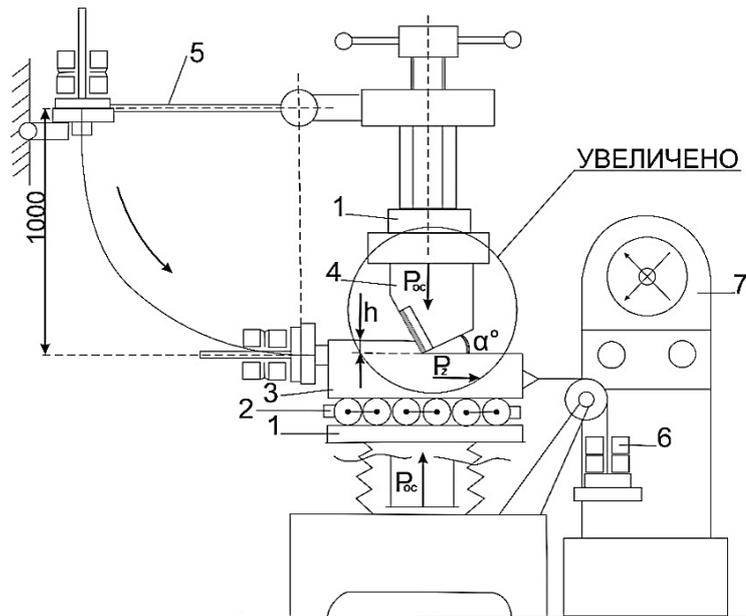


Рис. 2.11. Схема испытательного стенда на базе гидравлического пресса:

1 – плиты пресса; 2 – опорные ролики; 3 – модель породы из нормализованной инструментальной высокоуглеродистой стали У8А; 4 – фрагмент долота с PDC; 5 – копер; 6 – нагрузочное устройство для P_z ; 7 – индикатор осевой нагрузки $P_{ос}$

Таблица 2.2.

Результаты исследования аномального износа режущих элементов PDC

№ п/п	Исследуемый параметр	Характеристика породы: Крепкий известняк, $P_k = 960$ МПа; $a = 18$ мг			
		Толщина срезаемого слоя породы h , мм			
		1,0	1,2	1,5	2,0
1	Осевая нагрузка $P_{ос}$, Н	2040	2450	3060	4080
2	Усилие резания P_z , Н	510	613	766	1020
3	Скорость резания $V_{рез}$ м/с	1,35	1,35	1,35	1,35
4	Скорость импульса крутильной волны V м/с	245	245	245	245
5	Масса гири копра G , кг	2,5	3,0	3,76	5,0
6	Энергия неупругого удара, $\omega_{сж}$, Дж	25	30	37,6	50
7	Площадь поверхности скола резца PDC, $S_{ск}$, мм ²	20	25,5	31	36,5
8	Напряжение сжатия на поверхности скола $\zeta_{сж}$, МПа	102	96	99	111,8
9	Ударная вязкость со сжатием* d_n , Дж/см ²	125	117	121,3	137

*Ударная вязкость со сжатием определяется для ВК и PDC, устанавливаемых на инструментах режущего и режуще-скалывающего типа.

После нагружения фрагмента долота с PDC за счет $P_{ос}$ и P_z производили (наносили) удар гирями копра. После образования скола PDC (рис. 2.12) замеряли площадь поверхности скола $S_{ск}$ (мм²) накладывая на поверхность скола

миллиметровку, находили напряжение сжатия на поверхности скола $\zeta_{сж} = P_{oc}/S_{ск}$ (МПа), затем вычисляли «ударную вязкость со сжатием» $d_{н}$, Дж/см².

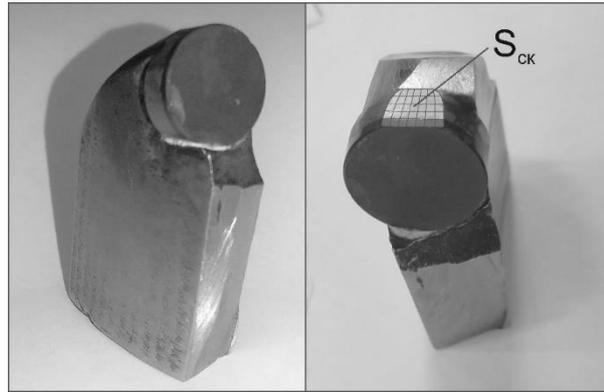


Рис. 2.12. Фрагмент долота с PDC до и после образования скола

В обычных условиях ударная вязкость вольфрамокобальтовых сплавов находится в пределах 2–7 Дж/см² что в 25–30 раз меньше ударной вязкости инструментальных сталей, например, 40Х и тем не менее они успешно работают, установленные на инструменты режущего и режуще-скалывающего типа, потому что при действии сжимающей нагрузки их ударная вязкость возрастает в 20–25 раз. На рис. 2.13 представлена зависимость ударной вязкости при действии сжимающей нагрузки.

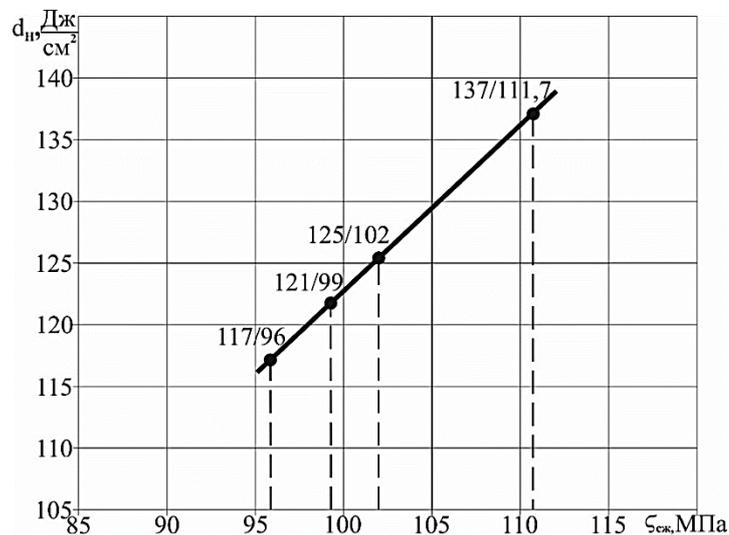


Рис. 2.13. Зависимость ударной вязкости PDC от действия сжимающей нагрузки $\zeta_{сж}$ при бурении скважин

Таким образом исследование аномального износа пластин PDC от действия сил по передней грани показывает, что крутильные колебания бурового става [100] формирующие ударную нагрузку на режущие элементы бурового

долота приводят к образованию крупных и мелких сколов PDC. И хотя вероятность формирования удара на PDC не высока (менее 20 %) $P \leq 0,2$ анализ причин выхода из строя отработанных долот показывает, что число аномально и нормально изношенных режущих PDC на долоте примерно одинаково. Это значит, что решение задачи по уменьшению крутильных колебаний бурового става, приводящих к возникновению аномального износа пластин PDC является актуальной.

В расчетах, принятый нами показатель «ударной вязкости со сжатием» для PDC и вольфрамокобальтовых сплавов требует дальнейших исследований.

2.4. Влияние крутильных и продольных колебаний на прочностные свойства буровых долот, армированных пластинами PDC

Анализ имеющихся экспериментальных данных [29], полученных в лабораторных условиях и на отработанных долотах показал, что все многообразие видов аномального износа пластин PDC можно разделить на группы в зависимости от их размеров и площади скола ($S_{ск}$): 1 группа – мелкие сколы; 2 группа – средние сколы; 3 группа – крупные сколы.

Площади сколов можно рассматривать как образование дополнительных площадок затупления, определяющих удельную нагрузку на режущих кромках PDC.

Так, по данным при бурении скважины глубиной 1560 м по крепким породам VIII категории буримости с $P_k = 960$ МПа долотом $\varnothing 215,9$ мм и с лопастями, вооруженными 56 пластинами PDC, средняя скорость бурения составляла 10,5 м/час.

При этом на отработанных долотах более 15 % режущих элементов оказались аномально изношенными. Это значит, что решение задачи по уменьшению крутильных колебаний, приводящих к возникновению аномального износа пластин PDC, является актуальной.

Кроме того, крутильные колебания опасны еще и тем, что они порождают развитие сильных продольных колебаний. Колебания этого рода вызывают

аномальный износ пластин PDC породоразрушающего инструмента, от действия на них сил по задней грани.

Условием резонанса продольных автоколебаний, вызванных крутильными, будет равенство собственных частот крутильных (W_k) и продольных (W_n) колебаний, т.е. должно соблюдаться условие:

$$W_k = W_n. \quad (2.49)$$

Для возникновения продольных автоколебаний, возникающих в результате крутильных, необходима строгая синхронизация собственных крутильных и продольных частот породоразрушающего инструмента, то есть частота продольных резонансных колебаний $\nu_{рез}$ равна продольной круговой частоте $W_{к.рез.}$, поделенной на 2π . В результате этого получаем:

$$\nu_{рез} = \frac{W_{к.рез.}}{\lambda\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{k\pi\lambda}{2l_{рез}}, \quad (2.50)$$

где $\nu_{рез}$ – частота продольных резонансных колебаний; $l_{рез}$ – резонансная длина колонны; $k = 1, 2, 3$ – числа натурального ряда.

Продольные автоколебания могут начинаться только лишь с некоторой определенной глубины скважины. Причем частота продольных автоколебаний $\nu_{рез}$, начиная от максимального значения при глубине примерно 40 м, убывает до минимального – 25 Гц с увеличением длины бурильной колонны $l_{рез.}$, с увеличением глубины скважины частота продольных авто колебаний уменьшается.

На рис. 2.14 представлен график взаимосвязи резонансных длин и частот бурильной колонны в случае продольных колебаний.

Из графика видно, что с увеличением глубины скважины частота продольных автоколебаний уменьшается.

В моменты наступления равенства частот крутильных и продольных колебаний возникают предпосылки для их совместного воздействия на заднюю поверхность режущих пластин PDC, приводящих к образованию сколов по задней грани.

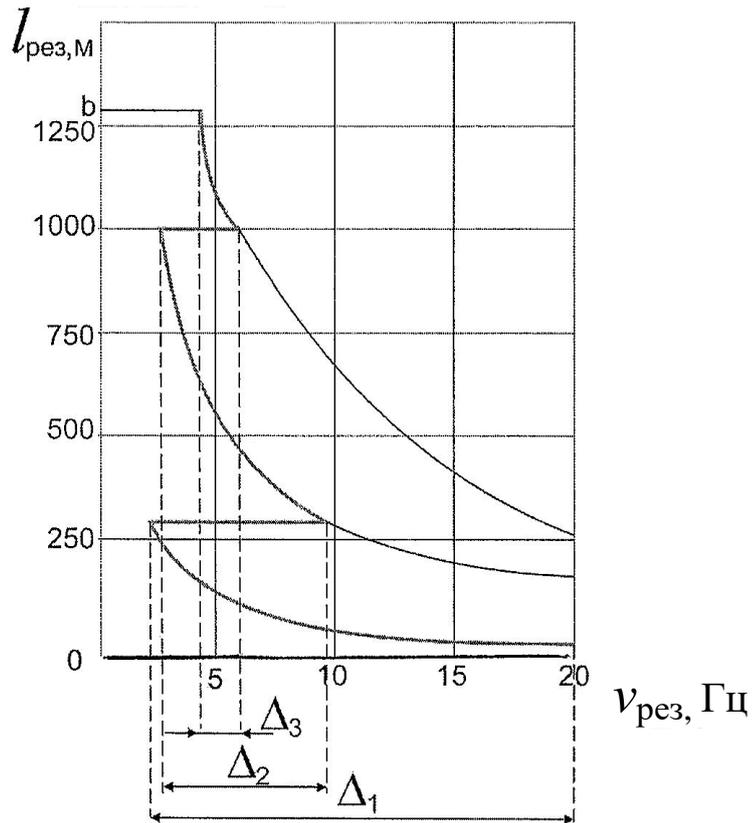


Рис. 2.14. График взаимосвязи резонансных длин и частот бурильной колонны в случае продольных автоколебаний

Анализ имеющихся экспериментальных данных на обработанных долотах показал, что аномальный износ пластин PDC можно разделить на группы в зависимости от их размеров и площади скола $S_{ск}$, мм²:

1 группа – мелкие сколы, где $S_{м.ск} \approx 9-18$ мм². К этой группе относятся около 60 % такого износа (58–60 %).

2 группа – средние сколы, $S_{ср.ск} \approx 19-30$ мм². В этой группе находятся около 30 % такого износа (27–30 %).

3 группа – крупные сколы, $S_{кр.ск} \approx 31-42$ мм². К ним относятся примерно 10 % такого износа (10–12 %).

На рис. 2.15 показана схема разделения сколов по группам.

Площадь сколов $\sum S$ можно рассматривать как образование дополнительных площадок затупления, определяющих удельную нагрузку на режущих кромках PDC. Тогда, например, зная процент аномального износа пластин PDC (см. табл. 2.3) можно рассчитать вероятную скорость бурения.

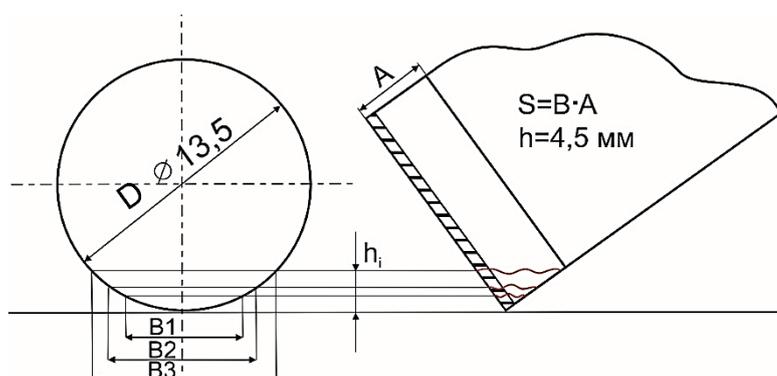


Рис. 2.15. Схема разделения сколов по группам

Таблица 2.3

Процент аномально изношенных пластин PDC по группам

$B = 2\sqrt{2Rh - h^2}$	$R = 7,75$
$h_i = 0,2; 0,3; 0,5; 1,0...1,5; 2,0; 2,5$	
$B_i = 3,2; 3,98; 5,48; 7,87; 8,48; 9,60; 10,5$	
$S = 9; 18; 30; 47$	

Площадь сколов $\sum S$ можно рассматривать как образование дополнительных площадок затупления, определяющих удельную нагрузку на режущих кромках PDC. Тогда, например, можно рассчитать вероятную скорость бурения.

Пусть (из табл. 2.2) долото диаметром 215 мм, вооруженное 56 пластинами PDC, бурило породы VIII категории буримости ($P_k = 920$ МПа) при осевой нагрузке $P_{oc} = 200$ кН, при этом на режущих PDC образовалось 15 % сколов.

1. Определяем, сколько образовалось сколов на 56 пластинах

$$n = \frac{56 \times 15}{100} = 9 \text{ сколов.}$$

2. Из них крупных сколов – 10%; $n_k = 1$ скол с общей площадью:

$$\sum S_k = n_k \times S_k = 36 \text{ мм}^2,$$

где $S_k = \frac{31+42}{2} = 36 \text{ мм}^2$ – средний размер площади крупного скола

3. Средних сколов – 30 %; $n_{cp} = 2,5$ сколов с общей площадью:

$$\sum S_{cp} = 2,5 \times 25 = 62 \text{ мм}^2,$$

где $S_{cp} = \frac{19+30}{2} = 25 \text{ мм}^2$ – средний размер площади среднего скола

4. Мелких сколов – 60%, $n_m = 5$ сколов с общей площадью:

$$\sum S_M = 5 \times 13,5 = 68 \text{ мм}^2,$$

где $S_M = \frac{9+18}{2} = 13,5 \text{ мм}^2$ – средний размер площади мелкого скола.

5. Общая площадь сколов

$$\sum S_{ск} = 68 + 62 + 36 = 166 \text{ мм}^2.$$

Известно, что на отработанных долотах количество нормально и аномально изношенных режущих элементов примерно одинаково, тогда суммарная площадь затупления:

$$\sum F_{зат} = \lambda \sum S_{ск} = 332 \text{ мм}^2.$$

При этом удельная нагрузка на режущих PDC была равна:

$$P_{уд} = \frac{P_{ос}}{\sum F_{зат}} = \frac{200000}{332} = 602 \frac{Н}{\text{мм}^2} = 602 \text{ МПа}, \quad (2.51)$$

где $P_{ос} = 700 \text{ кН}$ – осевая нагрузка на долото.

Механическая скорость бурения при этом составила:

$$V_{мб} = V_0 \times \frac{P_{уд}}{P_k} = 4,7 \times \frac{602}{920} = 5,07 \frac{\text{мм}}{\text{с}} = 11 \text{ м/час} \quad (2.52)$$

где $V_0 = 4,7 \text{ мм/с}$ – модуль скорости для породы VIII категории буримости с $P_k = 920 \text{ МПа}$.

Полученные результаты показывают высокую сходимость расчетного метода ($V_{мб} = 11 \text{ м/час}$) и экспериментального определения механической скорости бурения ($V = 10,3 \text{ м/час}$) по данным [75] с учетом нормального и аномального износа режущих элементов долот.

Преимущественное влияние крутильных и продольных колебания на образование сколов PDC по передней и задней грани подсказывает направление и поиск мероприятий по предупреждению аномального износа.

Для предупреждения возникновения крутильных колебаний необходимо бурильную колонну разгрузить от крутящего момента, передаваемого от ротора или ВЗД на буровое долото и оснастить режущие лопасти пластинами PDC с выпуклой передней гранью, способными ограничивать глубину внедрения резцов и гасить продольные колебания.

Для предупреждения возникновения крутильных колебаний и уменьшения износа периферийных режущих элементов на кафедре НТиТ (Нефтегазовые техника и технологии) ЮРГПУ(НПИ) было разработано двухъярусное долото со встречным вращением ярусов (патент РФ № 2695726).

При бурении скважин со сложным чередованием песчаников, алевролитов, с глинистыми прослоями, при переходах от крепких пород к мягким происходит резкое увеличение толщины срезаемого слоя и увеличение нагрузки, действующей на переднюю грань PDC, способную вызвать крутильные и продольные колебания в бурильной колонне.

Для предупреждения резкого внедрения долота в породу целесообразно оснащать лопасти долота пластинами PDC с выпуклой передней гранью.

На рис. 2.16 показана схема взаимодействия PDC с выпуклой и плоской передней гранью с породой.

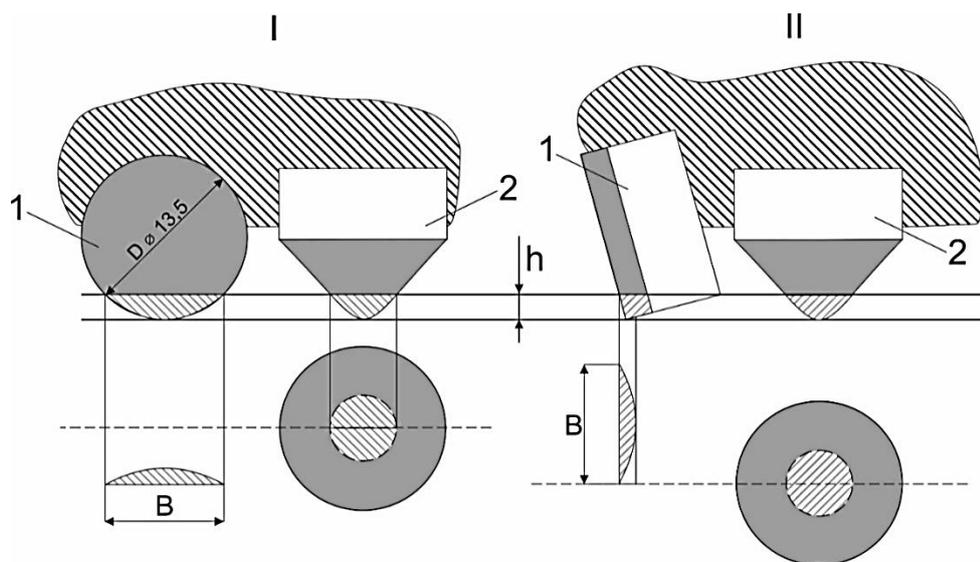


Рис. 2.16. Схема расположения пластин PDC на лопасти долота:

I – вид спереди пластин: 1 – с плоской; 2 – с выпуклой передней гранью;

II – вид сбоку пластин: 1 – с плоской; 2 – с выпуклой передней гранью

Так, при бурении породы VIII категории с $P_k = 920 \text{ МПа}$ с толщиной срезаемого слоя $h = 1 \text{ мм}$ при осевой нагрузке 4780 Н на PDC диаметром 13,5 мм при переходе на породу VI категории с $P_k = 650 \text{ МПа}$ режущий элемент войдет в породу на глубину $h = 4,5 \text{ мм}$. При этом произойдет резкое увеличение усилий резания, а, следовательно, и крутящего момента на долоте.

При установке на режущей лопасти пластин PDC с выпуклой передней гранью в виде круглого корпуса с основанием $\varnothing 11$ мм, имеющего максимальную площадь контакта с породой $F_2 = 80 \text{ мм}^2$, способную погасить на породе с $P_k = 650 \text{ МПа}$ осевую нагрузку 52 кН (5200 кг).

Тогда при переходе от породы с $P_k = 920 \text{ МПа}$ на породу с $P_k = 650 \text{ МПа}$ режущий элемент, срезающий на крепкой породе слой толщиной 1 мм, в мягкую породу войдет всего на 1,5 мм, т.к. основную часть осевой нагрузки на PDC, равной 4780 кН, примет на себя выпуклая передняя грань круглого конуса. По результатам выполненных исследований подана заявка на «Двухъярусное долото со встречным вращением ярусов, режущие лопасти которых оснащены пластинами PDC с плоской и выпуклой передними гранями, предупреждающими возникновение крутильных и продольных автоколебаний в бурильной колонне. На рис. 2.17 показаны общий вид долота и пример армированных режущих лопастей (1) долота пластинами PDC с плоской (2) и выпуклой (3) передними гранями.

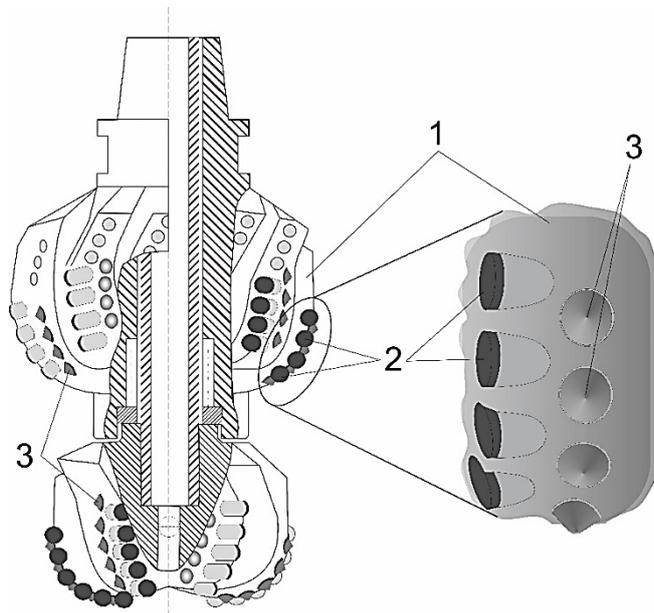


Рис. 2.17. Пример армирования лопасти долота пластинами PDC:

1 – лопасть, 2 – PDC с плоской передней гранью; 3 – PDC с выпуклой передней гранью.

Вибрации долота являются основной причиной износа и поломок резцов PDC. На долото воздействуют различные типы вибраций, в зависимости от целого

ряда факторов. Применение прогрессивных скоростных режимов бурения возможно лишь при использовании методов и средств борьбы с вибрациями.

Используя опыт эксплуатации буровых долот, армированных PDC, было установлено, что снижение уровня вибрации способствует уменьшению износа, увеличению механической скорости бурения и наработки на долото. В соответствии с этим нами были разработаны и внедрены в практику буровых работ технологические мероприятия, способствующие уменьшению вибрации буровых долот.

Причины вибраций можно разделить на три группы. К первой относятся геологические причины. Вибрация возникает при бурении перемежающихся твердых и мягких горных пород (например, тонкослоистых роговиков, джеспиллитов, кварцитов, а также пород, имеющих неравномерную зернистость и неоднородную структуру), разрушенных и трещиноватых, осадочных и слоистых, полосчатых и гнейсовидных, слоистость или сланцеватость которых образует острый угол с осью скважины. Особенно сильные вибрации возникают при проходке скважин в обрушающихся или кавернозных породах, а также в породах, образующих «желоба», где бурильная колонна может иметь сильный изгиб.

Вторая группа – технические причины. Их можно выделить четыре вида.

1. Применение искривленных бурильных и колонковых труб; отсутствие соосности в колонне из-за неправильного изготовления резьбовых соединений и корпусов ниппелей, муфт и замков; неравномерный односторонний износ труб и соединений.

2. Большие зазоры между бурильными трубами и стенками скважины, недостаточная жесткость бурильной колонны; ступенчатые конструкции скважин; повышенная разработка отдельных интервалов ствола и отклонение формы сечения скважины от кольцевого, отсутствие утяжеленных бурильных труб в компоновке бурового снаряда.

3. Применение долот, не соответствующих по типу физико-механическим свойствам и буримости проходимых горных пород, а также долот с

односторонним износом торца, с зашлифованными или с большим количеством сколотых, выпавших резцов; проходка перемежающихся по твердости пород без калибрующего расширителя.

Третья группа – технологические причины.

К ним относятся следующие причины:

1. Нарушение рекомендаций по применению параметров режима бурения: превышение осевой нагрузки на долото и скорости вращения инструмента против оптимальных или рациональных для данных условий бурения.

2. Бурение при значительных искривлениях ствола скважины, при наличии на забое кусков металла или горной породы, оставленным в скважине.

3. Бурение без применения антивибрационных средств, и с буровым раствором без должной смазывающей способности.

При повышенном размахе колебаний колонны создаются частые и сильные ударные нагрузки на долото, которые увеличивают его износ. На забое долота совершают очень хаотичные движения, которые включают боковые, осевые и крутильные вибрации, отмечающиеся отдельно и в комплексе. Забойные вибрации снижают срок службы долота за счет повреждения отдельных резцов.

Интенсивность колебаний колонны характеризуется амплитудой (величиной наибольшего отклонения колонны от оси скважины) и частотой (количеством колебаний за единицу времени). Величина, обратная частоте, называется периодом колебаний (время между двумя последовательными одинаковыми состояниями системы). При совпадении частоты вынужденных колебаний под действием возмущающих сил с частотой собственных колебаний колонны возникают резонансные явления, амплитуда и частота колебаний возрастают, и появляется вибрация. Скорость вращения колонны, приводящая к резонансу, называется критической. К главным факторам, вызывающим вибрацию бурильной колонны, относятся центробежные усилия, возникающие на несбалансированных участках колонны и в замковых соединениях, частые изменения величины крутящего момента и сжимающих колонну усилий, силы трения колонны о стенки скважины, пульсация промывочной жидкости и т.д.

Многообразие причин вибраций заставляет считать, что аналитически нельзя однозначно получить формулу для расчета значений частот колебаний труб. Наиболее достоверные данные о частоте могут быть получены лишь экспериментально-непосредственным измерением в скважине.

Смазки, добавляемые в буровой раствор, являются своеобразным демпфером, поглощающим удары колонны о стенки скважины, в результате чего снижаются поперечные вибрации, и стенки скважины меньше разрушаются. Последние должны обладать: способностью прочно прилипать к мокрой поверхности бурильных труб, соединений и стенок скважины; не смываться потоком промывочной жидкости; не образовывать сальники в скважине; достаточной вязкостью, чтобы образовывать упругий слой, способный противостоять ударным нагрузкам и гасить вибрации; высокими смазочными свойствами – максимально снижать потери энергии на трение при вращении колонны в скважине, уменьшать или предупреждать износ бурильных труб; антикоррозионными свойствами по отношению к бурильным и обсадным трубам.

Когда резцы PDC асимметрично внедряются в забой скважины, мгновенный центр вращения перемещается в это место и долото пытается вращаться вокруг точки, не представляющей геометрический центр, Это создает обратно-направленное движение, или завихрение, поскольку центр вращения движется вокруг ствола против направления вращения долота. В результате этого создается многолепестковая картина забоя скважины вместо концентрического кругового резания долотом (рис. 2.18), то есть возникают вибрации: осевая (продольная), крутильная и боковая (поперечная) [34, 35].

Боковые вибрации и высокие ударные нагрузки на заднюю часть резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами снижают срок службы долота и могут вызвать его серьезную поломку. Менее разрушительное переднее завихрение происходит, когда мгновенный центр вращения движется по направлению вращения долота.

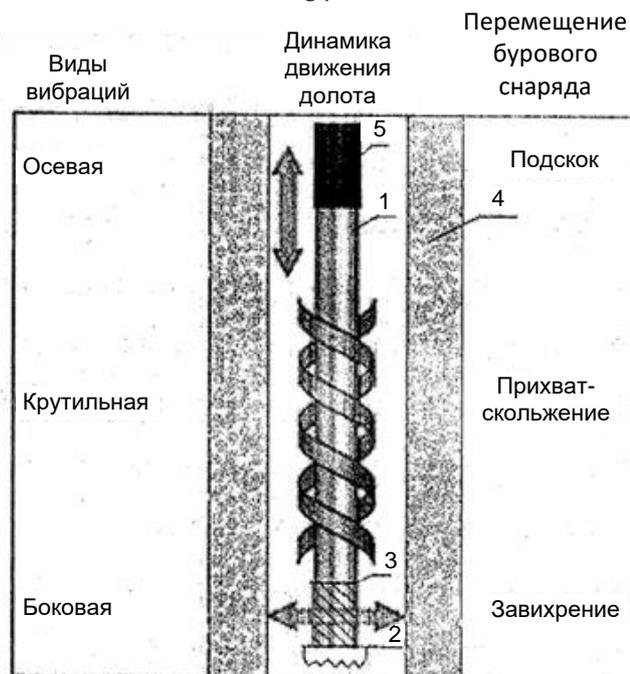


Рис. 2.18. Виды забойных вибраций

1 – бурильная труба, 2 – породоразрушающий инструмент, 3 – переводник, 4 – ствол скважины, 5 – утяжеленная бурильная труба

Повышенная вибрация бурового снаряда приводит к уменьшению проходки на долото и более интенсивному износу как инструмента так и оборудования, увеличению количества аварий с бурильными трубами, расходу дополнительной энергии. Всё это в конечном итоге снижает производительность и уменьшает эффективность бурения долотами, армированными пластинами PDC. Поэтому необходимо всегда своевременно принимать меры для предупреждения и снижения вибрации бурильной колонны.

В настоящее время отечественной промышленностью освоено производство измерительной аппаратуры, позволяющей провести всесторонние исследования параметров вибрации, возникающей на буровых станках в процессе их эксплуатации.

На основе проведенных исследований динамики работы всех типов буровых станков можно рекомендовать следующий порядок работы с виброаппаратурой:

1. Для определения типа виброизмерительной аппаратуры, позволяющей точно, без искажений, записать основные показатели вибраций и места

установки датчиков, необходимо сделать ряд пробных замеров на станке ручным вибрографом ВР-1.

2. На основе данных пробных замеров выбирается комплект аппаратуры, и намечаются места повышенной вибрации, в которых устанавливаются датчики в количестве, соответствующем рабочей программе.

3. При измерениях датчики жестко крепятся на объекте испытания (пол кабины машиниста, пол машинного отделения, вращатель, механизм подачи, буровой став).

4. Определяется длина записи осциллограммы, существенно влияющая на точность вычисления статистических характеристик случайного процесса.

Одновременная запись вибрации различных узлов и конструкций станка позволяет яснее представить картину их колебаний при одних и тех же условиях работы.

Развитие технологий, направленных на снижение вибраций является одним из направлений в области разработки конструкций долот. Для противостояния этой проблеме создано большое количество самых разнообразных конструкций из чрезвычайно дорогостоящих материалов, но проблема по-прежнему не решена. Нами предусмотрен следующий путь решения этой проблемы: минимизация вибраций буровой колонны с одной стороны, и оптимизация конструкции долота с другой. В качестве способа решения этих проблем предлагается использовать 3-х ступенчатое расположение резцов PDC на корпусе долота, с установкой пластин PDC под отрицательными углами резания, применения стабилизирующих долот со спиральной траекторией размещения PDC, использование схемы расположения резцов PDC способствующих снижению вибрации, а также специального бурового раствора с высокой смазывающей способностью. Внедрение этих мероприятий в практику буровых работ будет способствовать снижению вибрации и износа PDC и, как результат, повышению скорости бурения и наработки на долото.

Из данных табл. 2.4 следует, что наиболее частым видом разрушения режущей части PDC является их износ (50,0 %) из них скол со стороны передней

границы (23,7 %), скол со стороны задней грани (14,5 %), обрыв пластин PDC (2,6 %), раздробление PDC (9,2 %), остальное (50 %) – износ.

Таблица 2.4.

Виды разрушения PDC

№ п/п	Вид разрушения	Количество поломок		
		износ	поломка	% от общего числа
1	Износ PDC	38		50,0
2	Скол со стороны передней грани PDC		18	23,7
3	Скол со стороны задней грани PDC		11	14,5
4	Отрыв пластины PDC		2	2,6
5	Раздробление PDC		7	9,2
	ВСЕГО		76	100

Оценивая полученные экспериментальные результаты необходимо отметить, что наибольший процент выхода из строя долот, по причине разрушения PDC, происходит из-за поломки PDC, отрыва пластины PDC, а также сколы по передней и задней грани. Причиной этих аварий является наличие забойной вибрации.

Опыт работы на месторождениях в России дает основания утверждать, что вибрации долота зачастую являются основной причиной износа резцов PDC. На долото может действовать различные типы вибраций, но вращающаяся (поперечная вибрация) и эффект пружины (продольная) вибрация встречаются наиболее часто. Эффектом пружины называется замедление вращения долота, при контакте с горной породой от трения, ведущее к остановке вращения. При этом энергия вращения продолжает поступать на долото от бурового станка через бурильные трубы, пока она не преодолеет силу трения. Тогда буровой снаряд начинает раскручиваться с ускорением, превышающим в два и более раза номинальную скорость вращения.

Также, как и при поперечной вибрации это увеличивает ударную нагрузку на PDC, приводящую к их поломке, слому, потере, износу.

Оценивая вышеизложенное и с учетом опыта отработки буровых долот, армированных PDC, необходимо отметить, что основными причинами вибраций при бурении горных пород VI–VIII категории по буримости являются:

1. Неверно подобранная конструкция низа бурильной колонны;
2. Отсутствие в комплектации бурового снаряда утяжеленных бурильных труб и амортизатора.
3. Не рационально подобранные технологические параметры (нагрузка, частота вращения, количество и качество промывочной жидкости).
4. Применение бурового раствора без необходимой смазывающей способности.
5. Применение буровых долот не способных конструктивно решать вопросы снижения вибраций.

Обобщая выполненные исследования по борьбе с вибрацией необходимо отметить:

1. Из трех типов вибраций – поперечной, крутильной и продольной – последняя является самой значимой.
2. Поперечные колебания могут появиться в случае, если буровой станок или ведущая труба плохо отцентрированы, а в комплекте бурового снаряда отсутствуют УБТ.
3. Поперечная вибрация бурильных труб возникает также за счет продольного изгиба труб и центробежных усилий, возрастающих пропорционально квадрату угловой скорости, вращения. Центробежные усилия при вращении бурильных труб вызываются неуравновешенностью бурильного вала, смещением центра тяжести бурильных замков от оси скважины вследствие неправильного изготовления замков и резьбовых соединений, а также из-за разностенности и овальности труб.
4. Механическая скорость бурения возрастает на 40 % в случае применения антивибрационного долота, армированного резцом PDC, в комплекте с УБТ, вибрационного амортизатора и бурового раствора с высокой смазывающей способностью.
5. Работа бурильной колонны в растворе с высокой смазывающей способностью является одним из эффективных способов снижения поперечной вибрации долот. Наличие в растворе достаточного количества смазки способствует

уменьшению силы трения бурильной колонны о стенки скважины и снижению затрат энергии, потребляемой при бурении.

Выполненные работы позволили сделать следующие выводы:

1. Предложена оптимальная конструкция долот, не имеющих аналогов в мире, с «агрессивным» вооружением режущей части – большим выступом, оптимальными углами установки PDC и возможностью их замены.

2. Данные долота изготавливаются классическим способом. Их геометрия и схема установки PDC на корпусе позволяет работать инструменту в более стабильном режиме. Пластина PDC крепится на корпусе долота, как с помощью пайки, так и механическим путем, что позволяет в случае выхода из строя быстрее ее заменить.

3. Гидродинамический анализ работы долот, армированных резцами PDC, позволил внести изменения в их конструкцию, что позволило улучшить очистку забоя от шлама, охлаждение резцов, усилить турбулентность потока промывочной жидкости.

4. Разработанный метод определения геометрических параметров режущей части PDC позволит на стадии проектирования проводить имитационные испытания, по результатам которых конструктор уточняет варьируемые параметры проектируемых резцов и находит их оптимальные варианты.

5. Преимущество пластины PDC состоит в том, что она в процессе работы не меняет контактную площадь режущего элемента (резца) с забоем скважины, самозатачивается и имеет до 30 % отработку алмазного слоя;

6. Внедрение в практику буровых работ стабилизирующих, антивибрационных буровых долот и бурового раствора с высокой смазывающей способностью способствует уменьшению вибраций, увеличению механической скорости бурения и проходки.

7. Разработанные конструкции позволяют повысить эффективность долот, армированных PDC, и, в конечном счете, добиться увеличения коммерческой скорости бурения. Долота представляют большой интерес для отрасли, и требует проведения дальнейших исследований по конструкции и технологии

применения.

2.5. Регрессионное и нейросетевое моделирование для определения поломок пластин PDC

Бурение скважин на нефть и газ в комплексе работ при геологоразведке выходит на первое место, как по стоимости работ, так и по качеству и количеству геологической информации, получаемой в ходе их проведения. Породоразрушающим инструментом бурят осадочные, метаморфические и магматические породы на глубину до семи километров. Эффективность процесса бурения скважин, особенно в твердых горных породах, в значительной степени определяется эксплуатационными показателями породоразрушающего инструмента [14, 107].

В последнее время на первый план выходит породоразрушающий инструмент, армированный алмазно-твердосплавными пластинами PDC [5–9]. В работе сделана попытка обобщения и систематизации результатов исследований по технологии нормального и аномального износа буровых долот, армированных PDC. Известно, что вибрации бурового долота, армированного PDC, являются основной причиной аномального износа резцов PDC. На долото могут действовать различные типы вибраций: осевая, радиальная (поперечная), торсионная (эффект пружины), но радиальная и торсионная вибрации встречаются наиболее часто (рис. 2.19).

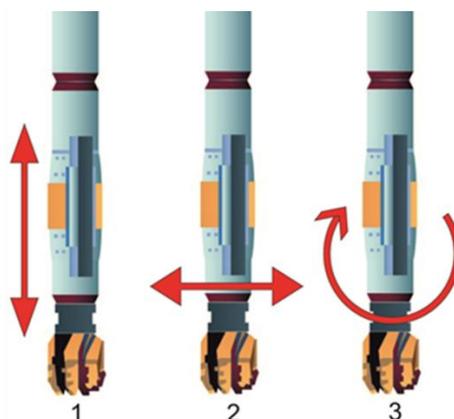


Рис. 2.19. Основные виды вибраций долота, армированного PDC, при бурении скважин:

1 – осевая вибрация; 2 – радиальная (поперечная) вибрация; 3 – торсионная вибрация (эффект пружины)

Осевая вибрация зависит от нагрузки и частоты вращения долота, а также жесткости КНБК. Торсионные колебания вызывают снижение скорости вращения КНБК при внедрении в горную породу на забое, вплоть до остановки вращения. При этом энергия вращения непрерывно сообщается долоту буровым станком по колоннам бурильных труб или забойными двигателями до тех пор, пока она не превысит предел прочности породы. В это время буровой снаряд с породоразрушающим инструментом (ПРИ) начинает раскручиваться с ускорением, превышающим в два или более раза номинальную скорость вращения. При этом, как и при поперечной вибрации, увеличивается ударная нагрузка на резцы PDC, что может привести к их сколу, слою и потере, в зависимости от глубины внедрения резца в породу и его положения на забое.

Торсионные колебания зависят от глубины внедрения PDC в горную породу. При большой глубине внедрения реактивный момент возрастает, а, следовательно, возрастает и риск возникновения торсионных колебаний. При использовании PDC меньшего диаметра, глубина внедрения резцов будет меньше, что способствует снижению реактивного момента. Справиться с влиянием данного эффекта можно уменьшением скорости вращения ПРИ и увеличением осевой нагрузки на режущие PDC элементы. Радиальная вибрация – это такой тип вибрации, при котором вибрация долота происходит вокруг его оси и не является его геометрическим центром. Происходит быстрое ускорение и замедление вращения долота, что значительно увеличивает ударную нагрузку на PDC. Добиться уменьшения радиальной вибрации можно путем увеличения нагрузки на PDC, уменьшением частоты вращения и увеличения жесткости КНБК [].

Опыт эксплуатации буровых долот, армированных PDC, показывает, что наибольший процент аномального износа по причине вибраций (более 50 %) происходит за счет скола или слома резца. Исходя из вышеизложенного, была поставлена задача – минимизировать аномальный износ резцов PDC на буровом долоте. Решение этой задачи будет способствовать увеличению проходки на долоте, росту средней рейсовой и механической скорости бурения.

Аномальный износ пластин PDC – есть причина частичного выхода из строя долота при неудачно выбранных значениях основных параметров бурения – нагрузки P и частоты вращения N . Оптимизируя эти два основных технологических параметра, при верно заданных жесткости низа буровой колонны и количестве прокачиваемой жидкости, необходимо добиться минимизации аномального износа резцов PDC на буровом долоте.

Для буровых компаний очень важно добиться оптимальной технологии отработки долот, армированных PDC. В распоряжении технолога-буровика не всегда имеются в наличии сведения о всех возможных вариантах аномального износа резцов породоразрушающего инструмента и о возможных причинах его появления, возникающих при бурении или в нештатных ситуациях. Поэтому обобщить знания специалиста на все возможные диапазоны параметров бурения можно как на основе математико-статистических методов регрессионного анализа, так и на основе популярных в настоящее время технологий искусственного интеллекта и, в частности, искусственных нейронных сетей (ИНС).

Аномальный износ резцов PDC в процессе бурения скважин был всегда и от него невозможно избавиться полностью, но подбирая оптимальное значение P и N , и получая при этом максимальную механическую скорость бурения V как определяющий фактор, решим задачу минимизации аномального износа резцов PDC.

Исследования проводились с использованием полевых данных обработки долот, армированных PDC, диаметром 215,9 мм, с 8 лопастями, вооруженными 56 пластинами PDC. Бурение скважин осуществлялось по горным породам VI–VIII категории по буримости. Фрагмент исходных данных для создания моделей представлен в табл. 2.5.

Полный выход долота из строя – редкость, а процент частичного аномального износа резцов PDC эксперт определяет следующим образом:

$$Pr_{pol} = (n_{пол}/n_{общ}) \cdot 100\%, \quad (2.53)$$

где $n_{ан}$ – число резцов PDC, вышедших из строя за фиксированный момент времени; $n_{общ}$ – общее число элементов долота.

Таблица 2.5

Фрагмент обучающей выборки

	P , кН	N , об/мин	V , м/час	$PrPolom$, %
Низкая скорость бурения	70	200	2,0	0,5
	70	210	2,2	0,5
	80	230	3,2	0,6
	80	240	3,5	0,6
	80	250	4,0	0,6
	90	260	4,2	0,7
	90	270	4,7	0,7
	90	280	5,0	0,7
	100	290	5,6	0,7
	100	300	5,9	0,7
Средняя скорость бурения	100	310	6,0	0,8
	130	240	7,4	1,6
	130	250	7,6	1,7
	135	260	7,8	1,7
	135	270	7,9	1,8
	135	280	7,9	1,9
	140	290	8,0	1,9
	140	300	8,0	2,0
	140	310	8,1	2,1
	145	200	8,1	2,2
	145	210	8,2	2,6
	145	220	8,3	3,4
	150	230	8,4	4,3
150	240	8,4	4,5	
150	250	8,4	4,7	
Высокая скорость бурения	185	210	9,2	9,3
	185	220	9,2	9,4
	190	230	9,3	9,6
	190	240	9,3	9,7
	190	250	9,4	9,7
	195	260	9,6	10,5
	195	270	9,7	10,6
	195	280	9,8	10,8
	200	290	10,0	14,9
	200	300	10,3	15,0
200	310	10,5	15,1	

Анализ имеющихся экспериментальных данных показал, что всё многообразие поломок можно разделить на группы в зависимости от их размеров и площади скола S , мм²:

1 группа: мелкие сколы, где $S = 9 \div 18$ мм²;

2 группа: средние сколы, где $S = 19 \div 30 \text{ мм}^2$;

3 группа: крупные сколы, где $S = 31 \div 18 \text{ мм}^2$; к ним относится примерно 10 % поломок.

Площади сколов ΣS можно рассматривать как образование дополнительных площадок затупления, определяющих удельную нагрузку на режущих кромках PDC. Тогда, например, зная процент поломок и режим бурения можно рассчитать вероятную скорость бурения.

Пусть долото диаметром 215 мм вооруженное 56 пластинами PDC, бурило породы VIII категории буримости ($P_k = 920 \text{ МПа}$) при осевой нагрузке $P_{oc} = 200 \text{ кН}$, при этом на режущих PDC образовалось 15 % сколов

1. Число образовавшихся сколов на 56 пластинах

$$N = 56 \cdot 15/100 = 8,4 \text{ скола.}$$

2. Из них, мелких сколов – 60 % ($\Pi_m = 5$ сколов) с общей площадью

$$\Sigma S_m = \Pi_m \cdot S_m = 5 \cdot 13,5 = 68 \text{ мм}^2,$$

где $S_m = 13,5 \text{ мм}^2$ – средняя площадь мелких сколов

3. Средних сколов 30 % ($\Pi_{cp} = 2,5$ скола) с общей площадью

$$\Sigma S_{cp} = \Pi_{cp} \cdot S_{cp} = 2,5 \cdot 25 = 62,5 \text{ мм}^2,$$

где $S_{cp} = 25 \text{ мм}^2$ – средний размер площади средних сколов.

4. Крупных сколов – 10 % ($\Pi_{kp} = 1$ скол) с площадью $S_{kp} = 36 \text{ мм}^2$

где $S_{kp} = 36 \text{ мм}^2$ – средняя площадь крупных сколов.

5. Общая площадь сколов

$$\Sigma S_{ск} = 68 + 62 + 36 = 166 \text{ мм}^2.$$

Известно, что на отработанных долотах количество изношенных и поломанных режущих элементов примерно одинаково, тогда суммарная площадка затупления равна

$$\Sigma S_{ск} + \Sigma F_{зат} = 332 \text{ мм}^2.$$

При этом удельная нагрузка на режущих кромках PDC была:

$$P_{уд} = P_{oc} / \Sigma F_{зат} = 200000 / 332 = 602 \text{ Н/мм}^2 = 602 \text{ МПа.} \quad (2.54)$$

Механическая скорость бурения при этом была:

$$V_{мб} = V_0 \cdot P_{уд} / P_k = 4,7 \cdot 602 / 920 = 3,07 \cdot 3600 = 11 \text{ м/час,} \quad (2.55)$$

где $V_0 = 4,7$ мм/с – модуль скорости для пород VIII категории.

Полученные результаты показывают высокую сходимость расчетного метода ($V_{мб} = 11$ м/ч) и экспериментально определенной механической скорости бурения ($V_{экс} = 10,3$ м/ч) с учетом износа и поломок режущих элементов долота.

Анализ имеющихся экспериментальных данных показал низкую линейную корреляционную зависимость между P и N ($R_{P,N} = 0$), что является условием включения этих параметров в создаваемую модель в качестве факторных.

Высокая зависимость между скоростью и процентом поломок ($R_{V,Prpol} = 0,79$) позволяет рассматривать их в качестве результативных параметров, либо один из них может быть входным для другого. Линейные корреляционные зависимости входных и выходных параметров представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Коэффициенты корреляции параметров модели

	P	N	V	$Prpol$
P	1	0	0,95	0,93
N	0	1	0,05	0,04
V	0,95	0,05	1	0,79
$Prpol$	0,93	0,04	0,79	1

Низкая связь между N и V , N и $Prpol$ ($R_{N,V} = 0,05$; $R_{N,Prpol} = 0,04$) свидетельствует о том, что прямой линейной зависимости между этими парами параметров нет. Но это совсем не значит, что между ними отсутствуют другие, нелинейные зависимости. Влияние частоты оборотов на рассматриваемые выходные параметры бурения является существенно нелинейной. Косвенно это подтверждается непригодностью созданных линейных регрессионных моделей, построенных при уровне доверительного интервала 0,05:

$$V_{reg} = -0,06 + 0,49 \cdot P + 0,00 \cdot N \quad (2.56)$$

$$Prpol_{reg} = -10,49 + 0,97 \cdot P + 0,00 \cdot N \quad (2.57)$$

Коэффициенты регрессии для частоты вращения N в моделях (3.56) и (3.57) имеют порядок значений 10^{-4} (0,0029 и 0,0046), что практически исключает её из рассмотрения в качестве основного параметра регрессионной модели. Средние и

максимальные значения ошибок моделей соответственно равны 8,6 % и 96,4 % для (2.56), 82,1 % и 323 % для (2.57), что свидетельствует об их полной непригодности.

Создание модели для вычисления процента поломок на основе трех параметров P , N и V :

$$Prpol_{reg} = -10,63 + 1,96 \cdot P + 0,01 \cdot N - 2,02 \cdot V \quad (2.58)$$

ненамного улучшило ситуацию по сравнению с линейной моделью (2.57). Величины ошибок модели (2.58) соответственно равны 35,7 % и 214 %. Справедливости ради следует отметить, что выборы в значениях ошибок регрессионных моделей наблюдаются в области низких давлений (там имеют место существенные нелинейные зависимости) и частично в области высоких давлений.

Попытка создания нелинейных регрессионных моделей (2.59, 2.60) на основе метода наименьших квадратов (МНК) с использованием метода Гаусса-Ньютона и последующей проверкой применимости МНК показала следующие результаты:

$$V_{nlreg} = -0,04 \cdot P^2 + 0,00 \cdot N^2 + 1,53 \cdot P + 0,00 \cdot T - 6,62; \quad (2.59)$$

$$Prpol_{nlreg} = -0,10 \cdot P^2 + 0,00 \cdot N^2 + 1,82 \cdot P + 0,01 \cdot T + 7,21; \quad (2.60)$$

Уровень значимости α в обоих случаях был выбран равным 0,05. Проверка истинности пяти предпосылок МНК [14], а именно: 1) случайный характер остатков; 2) нулевая средняя величина остатков; 3) нормальное распределение остатков; 4) отсутствие автокорреляции остатков; 5) постоянство дисперсии остатков (гомоскедастичность) дала положительный ответ для предпосылок № 1–3. Выявлено наличие тенденции при проверке предпосылки № 4. Зарегистрирован незначительный выход за пределы доверительного интервала крайних левых (низкие давления) крайних правых (высокие давления) значений вектора остатков при проверке гомоскедастичности. Величины средних и максимальных значений ошибок – 9,1 % и 24,6 % для модели (2.59); 19,4 % и 65,6 % для модели (2.60) все же превышают максимально допустимое значение пригодности нелинейных моделей, равное 12–15 %.

Неполное удовлетворение предпосылок МНК и превышение порога пригодности требуют либо существенной корректировки рассматриваемых нелинейных моделей, либо использование принципиально иных методов и технологий определения оптимальных значений выходных параметров – аппарата теории искусственных нейронных сетей (ИНС) [7]. Способность к обобщению информации, описывающей нелинейные зависимости в сложных объектах, процессах и явлениях является неотъемлемой чертой ИНС, присущей им по внутренней природе – по структуре и по способу функционирования на основе обучения. Современный уровень технологии буровых работ как раз и относится к подобным высокотехнологичным наукоёмким процессам, характеризующимся большим числом режимов, типов параметров, объемов характеристик каждого типа, связанных сложными нелинейными соотношениями.

Нейронные сети помогают выявить связи между экспериментальными данными в тех случаях, когда статистические методы не справляются с задачей. По сравнению со статистико-математическими методами, ИНС менее требовательны к качеству априорных знаний. В рассматриваемом случае в качестве таких знаний выступают ограниченный состав выбранных входных параметров нейросетевой модели, отсутствие достоверных производственных данных для большинства граничных и ряда средних значений входных параметров. В подобных условиях нейронные сети часто дают быстрое и качественное решение задачи, как правило, не худшее, чем решение, получаемое статистическими методами, после тщательной подготовки данных для обучения сети. Разработка промышленно пригодной нейросетевой системы для определения управляющих параметров технологических процессов, как правило, осуществляется за значительно более короткое время (порядка нескольких месяцев) по сравнению с созданием аналогичной системы, требующей тщательного выбора математической модели на основе анализа имеющихся производственных данных, и информации, специфичной для данной области [39, 40, 44].

Для построения модели была использована нейронная сеть прямого распространения сигнала (feedforward) с двумя входами и двумя выходами (пакет NeuralNetworks системы Matlab). В результате циклического поиска наилучшей, в смысле минимума относительной ошибки на обучающей и тестовой выборке, оказалась сеть с двумя скрытыми слоями с десятью и тремя нейронами (рис. 2.20).

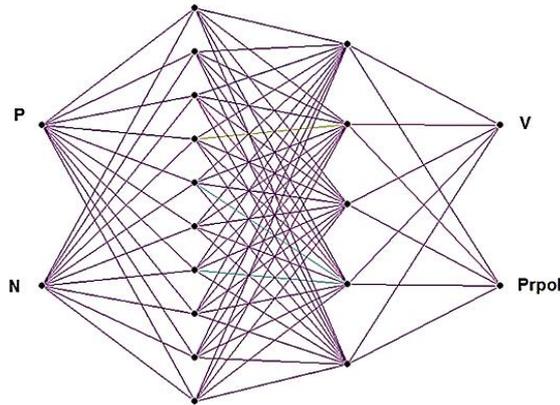


Рис. 2.20. Нейронная сеть для определения V , $Prpol$ на основе P , N

Функция обучения нейронов скрытого слоя – гиперболический тангенс (tansig), выходного слоя – линейная (purelin), алгоритм обучения – Левенберга-Марквардта. Функция вычисления ошибки при обучении сети – среднеквадратическая (mse). Способ выбора элементов обучающей выборки в процессе обучения – случайный. Остальные параметры обучения сети выбраны по умолчанию. Для обучения нейронной сети использовались те же данные, что и при составлении регрессионных моделей. Из общего количества входных векторов было выделено тестовое множество в объёме 20 % от общего числа векторов. Поскольку диапазоны входных и выходных параметров различны, их значения параметров были линейно масштабированы по диапазону изменения в интервал $[0 \dots 1]$:

$$\tilde{x} = \frac{(x_i - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})}, \quad (2.61)$$

где \tilde{x} – масштабированное значение параметра; x_i – текущее значение параметра; x_{min} , x_{max} – минимальное и максимальное значения параметра.

Абсолютные и относительные величины ошибок оптимальной сети оказались гораздо меньше величин ошибок, которые демонстрировали регрессионные модели. Анализ остатков, полученных в результате тестирования нейросетевой модели, показал, что, не смотря на достаточно высокую среднюю величину этих остатков по сравнению с регрессионной моделью (10^{-2} , 10^{-3} против 10^{-14}), остальные характеристики полностью удовлетворяют предпосылкам № 1–5. Этот факт свидетельствует в пользу применения ИНС-модели, учитывающей нелинейные зависимости.

Множество значений скоростей и процента поломок, вычисляемые нейронной сетью на всем диапазоне изменения давления $7 \div 20$ кН и частоты вращения $200 \div 310$ об/мин, представлены на рис. 2.21.

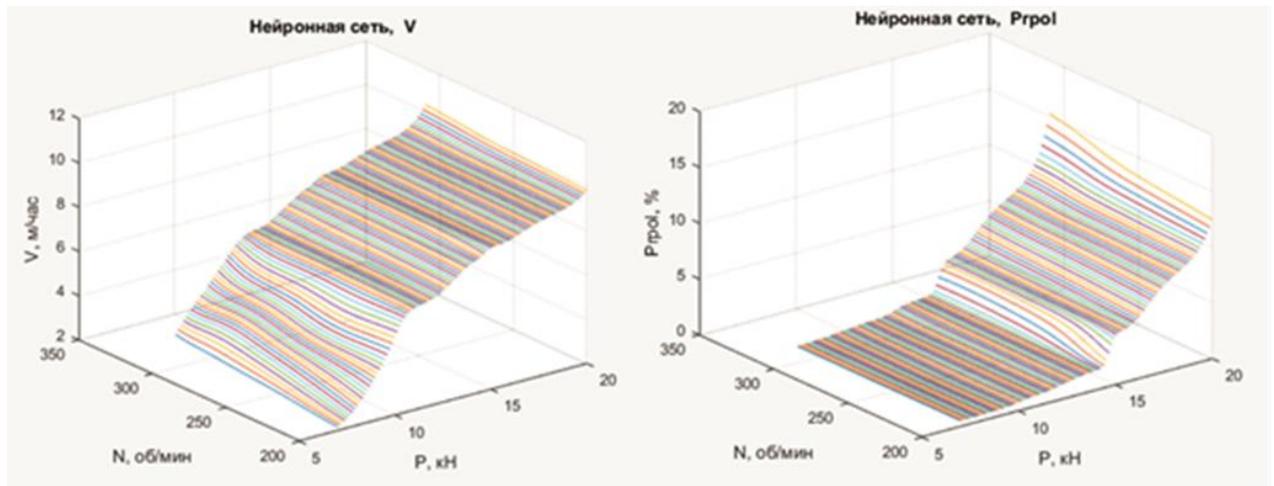


Рис. 2.21. Реакция сети на входные воздействия:

слева – скорость бурения V ; справа – процент поломок $Prpol$

Несмотря на приемлемые величины средних ошибок сети, максимальные значения ошибок нейросетевой модели всё еще значительны. Большая часть выбросов наблюдалась в области низких давлений, реже – в области высокого давления и почти никогда при средних значениях давления.

Учитывая вышесказанное, а также то, что механическая скорость бурения является определяющим фактором при выбраковке резцов PDC, предложенная модель вида:

$$\{P, N\} \rightarrow \{NN: 10 \cdot 5\} \rightarrow \{V, Prpol\} \quad (2.62)$$

была преобразована в новую модель, состоящую из двух последовательно соединённых сетей:

$$\{P, N\} \rightarrow \{NN: 10 \cdot 5\} \rightarrow \{V^*\}; \{P, N, V^*\} \rightarrow \{NN: 10 \cdot 5\} \rightarrow \{Prpol\} \quad (2.63)$$

Первая нейронная сеть ансамбля вычисляет значение скорости бурения V^* , а вторая сеть использует полученную скорость в совокупности с давлением и частотой оборотов долота для вычисления процента поломок (рис. 2.22).

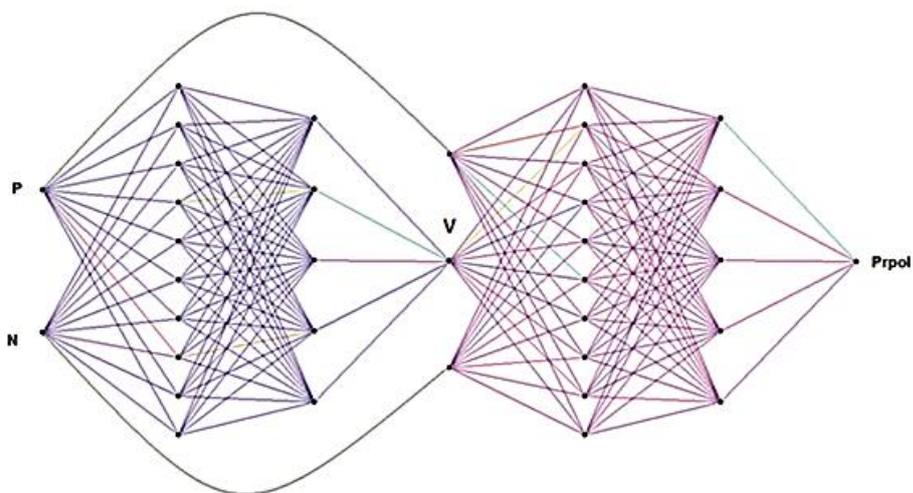


Рис. 2.22. Ансамбль нейронных сетей

В этом случае не только средние значения ошибок обеих сетей, но и выбросы ошибок, снижены до приемлемого уровня 12–15 %. Величины ошибок, при вычислении процентов поломок двумя предложенными моделями (2.62) и (2.63), представлены в табл. 2.7.

Таблица 2.7.

Величины ошибок нейронных сетей

№	Ошибки нейронной сети	Модель – 2.62		Модель – 2.63	
		V	Prpol	V	Prpol
1.	Среднее значение остатков на обучающей выборке	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01
2.	Среднее значение остатков на тестовом множестве	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01
3.	Среднее значение относительной ошибки на обучающей выборке	1,29	3,58	2,74	2,76
4.	Среднее значение относительной ошибки на тестовом множестве	2,05	4,48	2,95	2,82
5.	Максимальное значение относительной ошибки на обучающей выборке	12,82	19,90	10,67	11,96
6.	Максимальное значение относительной ошибки на тестовом множестве	14,74	16,89	11,03	13,07

На рис. 2.23 приведены поверхности отклика модели (2.63) при низких (200), средних (250) и высоких (310) значениях частоты оборотов.

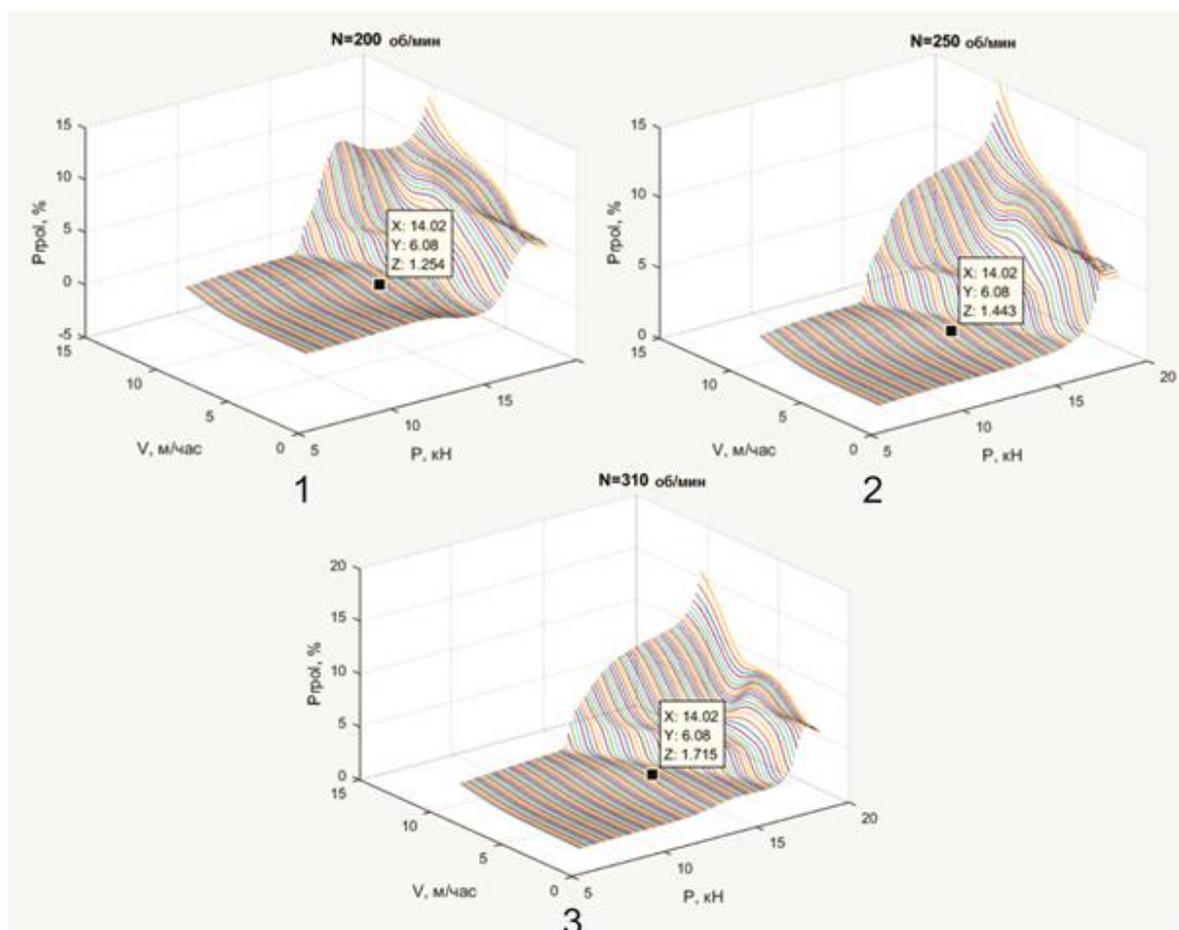


Рис. 2.23. Реакция второй сети (процент поломок):

1 – $N = 200$; 2 – $N = 250$; 3 – $N = 310$

Результаты экспериментов показывают, что последовательно соединенные сети моделируют сложные поверхности для вычисляемых значений V и $Prpol$ в области известных значений входных параметров P , N в отличие от более «гладких» поверхностей регрессионных моделей. С одной стороны, это говорит о более тонкой настройке модели, способной точнее определять значения искомых величин, с другой – на возможную подстройку сетей под данные обучающей выборки, сформированной экспертом.

Выполненные исследования позволили установить:

1. Использование нейросетевых моделей для целей минимизации поломок резцов PDC является актуальной задачей.

2. Предложенная модель ансамбля нейронных сетей позволяет добиться увеличения механической скорости бурения скважин на нефть и газ, а также проходку на долото, с учетом уменьшения поломок PDC.

3. Модель может быть использована при оперативном учете основных параметров бурения в системе геолого-технологических исследований.

4. Положительные результаты, полученные с помощью комплексной нейросетевой модели с использованием полевых данных отработки долот, армированных PDC, показали её пригодность и возможность дальнейшего развития путем учёта дополнительных параметров режима бурения и уточнения уже использованной входной информации.

5. Предложенная нейросетевая модель и её последующие модификации могут найти широкое применение при разработке технологического регламента отработки долот, армированных резцами PDC.

6. Использование нейросетевых моделей для целей оптимизации техники и технологии сооружения скважин на нефть и газ в настоящее время востребовано производителями и требует дальнейшего совершенствования.

2.6. Моделирование отработки буровых долот, армированных пластинами PDC

В настоящее время принято считать, что в области совершенствования породоразрушающего инструмента основным направлением является развитие машиностроительных технологий и материалов и что резервы его конструкционного совершенствования практически полностью исчерпаны. Однако анализ современных конструкций долот отечественного и зарубежного производства и результаты выполненных нами работ, позволяют заявить о создании новых конструкций буровых долот повышенной эффективности

Традиционные долота, армированные PDC, имеют одноярусное исполнение. Эта модель широко апробирована и имеет ряд преимуществ: относительная простота изготовления, высокие наработки, возможность реставрации. Однако стоит учитывать довольно узкий диапазон возможности работы данной компоненты в рамках категорий твердости горных пород и в особенности выше VII категории. Связанно данное явление, прежде всего с большой первоначальной

площадью соприкосновения торцевой часть долота с забоем. Каждая лопасть, состоящая из нескольких режущих элементов в единицу времени, проходит одинаковый путь резания и поэтому имеет одинаковую со всеми лопастями интенсивность изнашивания. Частота вращения для таких долот устанавливается, исходя из критической скорости резания, которая имеет максимальное значение на периферийных режущих элементах. Скорости резания на остальных линиях, более близких к оси вращения, ниже критических значений и убывают обратно пропорционально увеличению диаметров окружностей, на которых размещены режущие элементы. Исходя из данной информации нами предложено оригинальное решение задачи по увеличению скорости резания горной породы забуривающим радиусом меньшего диаметра. Сохранение диаметра происходит за счет использования калибрующего яруса.

На рис. 2.24 представлен общий вид (имитационная модель) двухъярусного долота. С целью упрощения технологии изготовления долото разделено на три составные части.

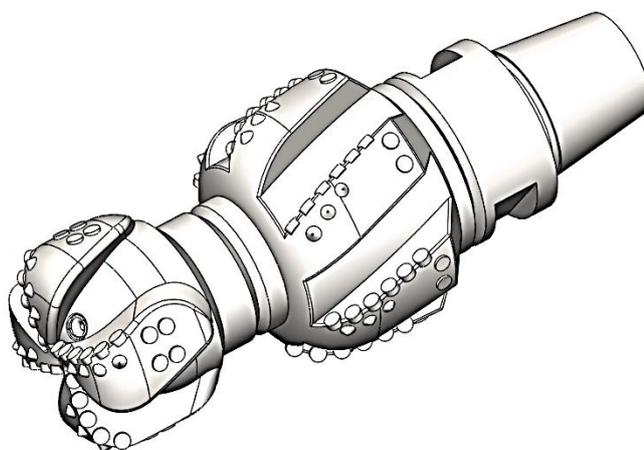


Рис. 2.24. Двухъярусное долото

На рисунке 2.25 показан хвостовик (1), нижний забуривающий (2) и верхний разбуривающий ярус (3) со стабилизаторными частями (4), которые состоят из ряда, симметрично расположенных режущих лопастей (5), которые, в свою очередь, включают радиально расположенные режущие элементы (6), отличающиеся тем, что долото разделено на ярусы, каждый из которых расположен соосно, при этом скорости резания наиболее удаленных от продольной оси ре-

жущих элементов забуривающего и разбуривающего ярусов не превышают критических значений.

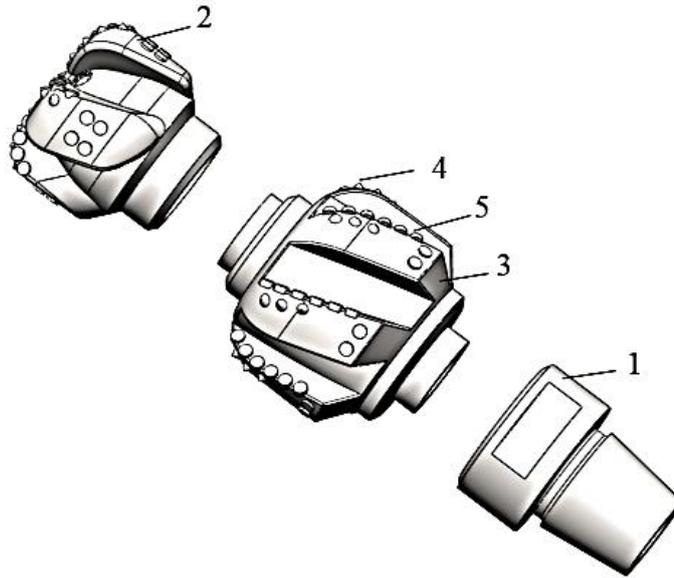


Рис. 2.25. Составные части двухъярусного долота

В ходе предварительного моделирования породоразрушающего инструмента при помощи программы SolidWorks нами были выявлены серьезные преимущества, которые в теоретическом плане дает данная конструкция долота. Одним из основных можно выделить уменьшение крутящего момента на буровом стае и предупреждение возможности возникновения крутильных колебаний при бурении, вызывающих поломки режущих элементов. Данная проблема решается за счет двуопорности ПРИ. Колебания, возникающие на нижнем ярусе, будут гаситься верхним разбуривающим ярусом, а также конусными резцами, расположенными между плоскими резцами PDC во второй линии резания.

Бесспорно, что наибольшую нагрузку будет испытывать забуривающий ярус и алмазно-твердосплавные пластины (PDC) установленные в нем (рис. 2.26). Промывочный узел долота представлен на рис. 2.27.

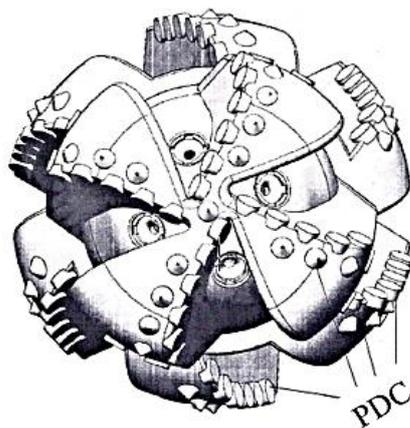


Рис. 2.26. Забуривающий (фронтальный вид) долота

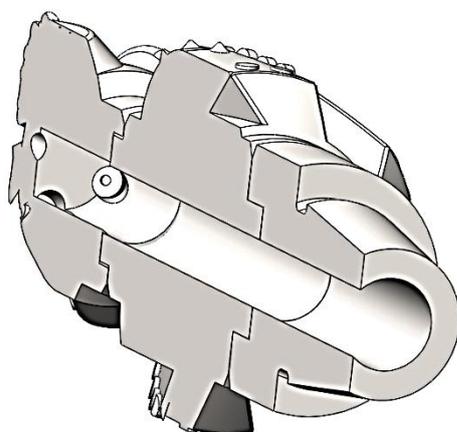


Рис. 2.27. Схема промывочного узла двухъярусного долота

Разработка имитационных моделей динамического взаимодействия бурового инструмента и породы позволяет получить сведения о распределении нормальных и касательных напряжений в контактной зоне, что является основой в дальнейшей оптимизации геометрических параметров PDC-резца, контактного взаимодействия и режимов резания, а также в прогнозировании степени износа PDC-резца на основе регрессионных моделей, полученных имитационно-экспериментальным методом.

Моделирование разрушения породы может выполняться как методом конечных элементов (МКЭ), так и метод дискретного элемента. Несмотря на ряд преимуществ последнего, он является гораздо более требовательным к вычислительным ресурсам, на основании чего было предложено выполнить моделирование в программной среде SIMULIA/Abaqus Explicit (Франция).

Программный конечно-элементный комплекс Abaqus — универсальная система общего назначения, предназначенная как для проведения многоцелевого

инженерного многодисциплинарного статического и динамического анализа, так и для научно-исследовательских целей в самых разных сферах деятельности. Abaqus предлагает открытый подход к решению сложных проблем и предоставляет неограниченные возможности по подключению пользовательских программ на всех этапах расчета конкретной задачи. Abaqus Explicit — модуль анализа сильно нелинейных переходных динамических процессов, использующий явную схему интегрирования метода конечных элементов.

Наибольший интерес данные модели представляют в области оптимизации геометрических параметров PDC-резца, контактного взаимодействия и режимов резания в зависимости от распределения контактных напряжений и свойств породы. В сочетании с экспериментальными исследованиями возможно прогнозирование степени износа PDC-резца на основе полученных регрессионных моделей. Общий алгоритм разработки имитационных моделей для решения динамических задач при взаимодействии бурового инструмента и породы представлен на рис. 2.28.

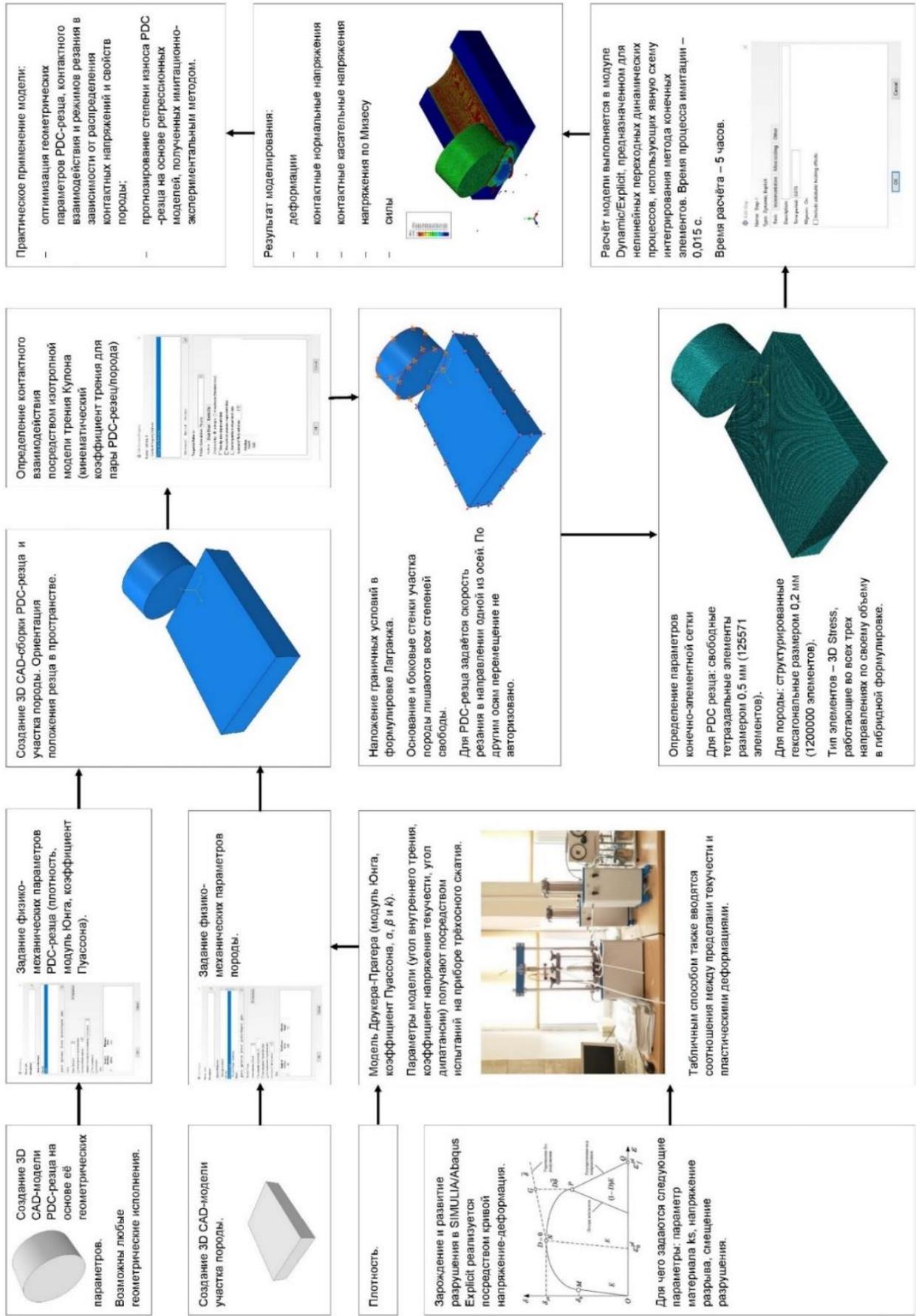


Рис. 2.28. Алгоритм создания динамической модели взаимодействия бурового инструмента и породы в Abaqus

PDC-резец представляет собой цилиндрический элемент диаметром от 8 до 24 мм. Создание 3D CAD-модели PDC-резца на основе её геометрических параметров в Abaqus Explicit показана на рис. 2.29.

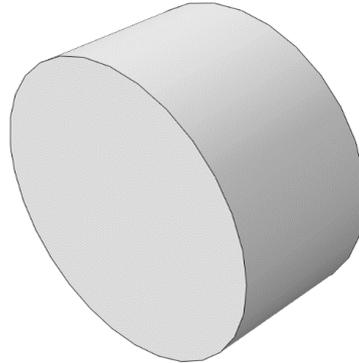


Рис. 2.29. 3-D модель резца PDC

Геометрические параметры PDC-резцов компании SF Diamond Co., Ltd представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8.

Геометрические параметры PDC-резцов компании SF Diamond Co., Ltd [95]

Диаметр (мм)	Высота (мм)
8.00/8.23	3,53
9,00	8,00
13.44	8,00
13.44	13.20
15.88	8,00
15.88	13.20
15.88	16.00
19.05	8,00
19.05	13.20
19.05	16.00
19.05	19.00

Другие возможные формы PDC-резцов представлены на рис. 2.30.

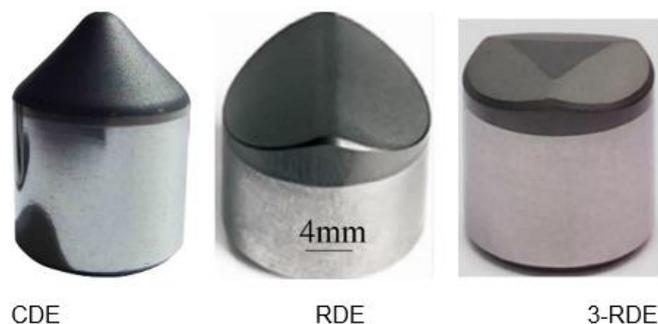


Рис. 2.30. Формы PDC-резцов [6]

Новое поколение 3D резцов RDE (гребнеобразный алмазный элемент) сочетает в себе срезающее действие цилиндрического резца PDC с дробящим эффектом зубка шарошечного долота. Эта уникальная геометрия позволяет разрушать породу более эффективно. Как показано на рис. 2.31, резец RDE с более толстым алмазным слоем имеет большую износостойкость, что повышает износостойкость долота в целом [92, 93].

Режущий элемент CDE (конический алмазный элемент) был спроектирован специально для оказания высокого давления на породу за счет уникальной конической формы алмазной части элемента CDE, которая способствует лучшей сопротивляемости к ударным нагрузкам и износостойкости. Резец CDE (рис. 2.31) контактирует с породой, оказывая эффект вспахивания, в результате чего снижается термическое воздействие трения на резец, что в свою очередь улучшает износостойкость в сравнении с резцом PDC [88, 92].

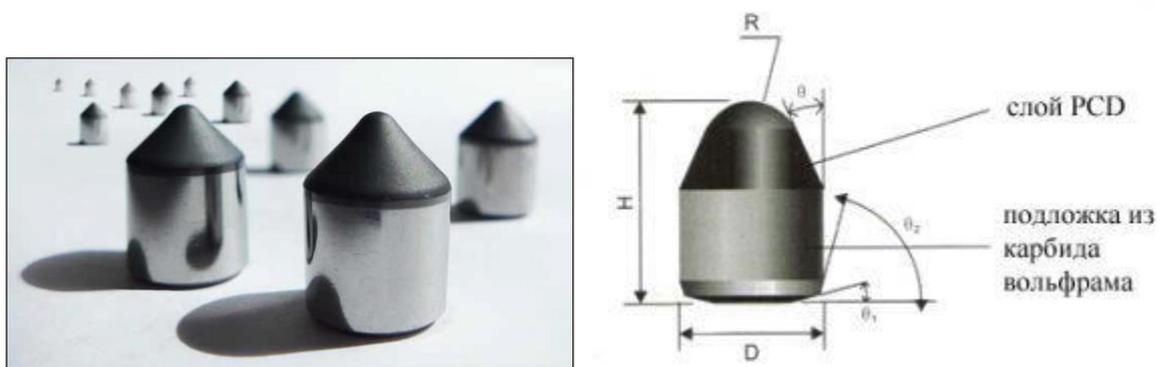


Рис. 2.31. Геометрия элемента CDE

Наиболее распространённые типоразмеры конических резцов представлены в табл. 2.8.

В 2015 году китайской компанией Sifangda была предложена концепция 3-RDE с тремя режущими кромками. Лабораторные испытания показали более высокую износостойкость и сопротивление усталости по отношению к классической форме. Геометрические параметры представлены на рисунке (рис. 2.32). Наиболее распространённые типоразмеры конических резцов представлены в табл. 2.9. Одним из возможных конструктивных исполнений может быть следующее: $\phi = 16 \text{ mm}$, $H = 13,6 \text{ mm}$, $H_1 = 10,6 \text{ mm}$, $L_1 = 3 \text{ mm}$, $\eta = 157^\circ$, $\zeta = 8^\circ$ [41].

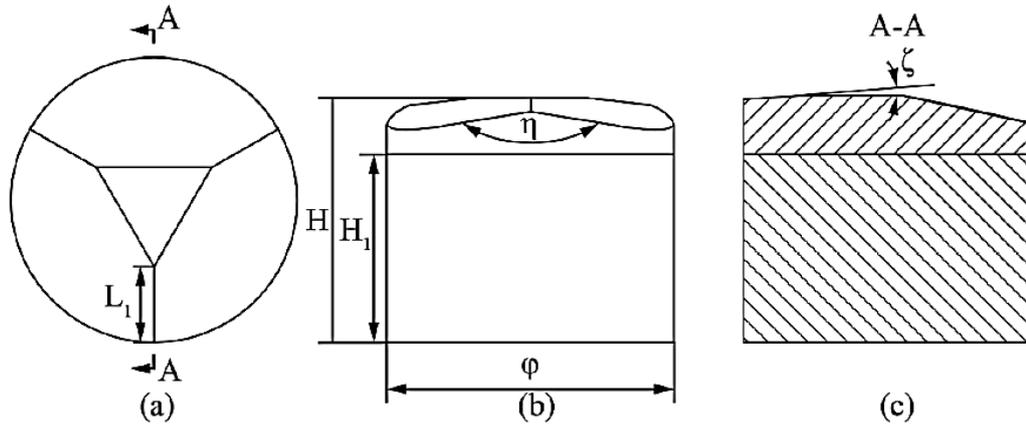


Рис. 2.32. Геометрия элемента 3-RDE

Таблица 2.9.

Наиболее распространённые типоразмеры конических резцов

Диаметр (D), мм	Общая высота резца (H), мм	Радиус (R), мм	Угол наклона θ
8	9,2	4,5	
9,5	10	4,9	
10	10,5	3,8	33°15'
11,2	13,8	5,5	21°00'
11,5	10	8,9	
12	9,5	8,6	
12,5	12	16,6	
13,4	14	6,7	
14	17,4	5,5	23°30'
14,5	20,6	5	23°15'

Положение в пространстве PDC-резца определяется углами наклона относительно осей x , y , z (рис. 2.33).

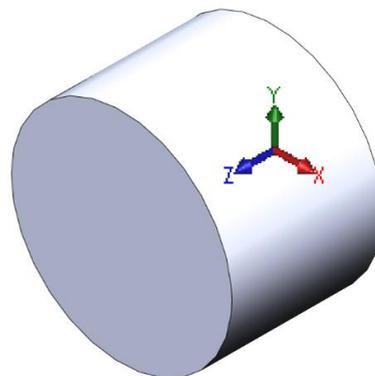


Рис. 2.33. Положение в пространстве PDC-резца

Физико-механические параметры PDC-резца представлены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Физико-механические параметры PDC-резца

Параметр	PDC-резец 1 [3; 32; 33]
Плотность, кг/м ³	3510
Модуль Юнга, ГПа	890
Коэффициент Пуассона	0,07
Теплопроводность, Дж/(м·с·°С)	543
Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°С)	790
Коэффициент теплового расширения, мм/(мм·°С)	2,5·10 ⁻⁶
Параметр прочности <i>A</i> , МПа	4000
Параметр прочности <i>B</i> , МПа	500
Параметр прочности <i>n</i>	0,14
Параметр разрушения <i>D</i> ₁	0,05
Параметр разрушения <i>D</i> ₂	1,873
Параметр разрушения <i>D</i> ₃	-2,272

Задание физико-механических параметров PDC-резца в Abaqus показано в табл. 2.11.

Контактное взаимодействие PDC-резца и породы определяется изотропной моделью трения Кулона:

$$|\sigma_t| \geq \mu \cdot |\sigma_n|,$$

$$|\sigma_t| < \mu \cdot |\sigma_n|,$$

где σ_t , σ_n – составляющие вектора контактного напряжения, μ – кинематический коэффициент трения.

Кинематический коэффициент трения для пары PDC-резец/порода принимается равным 0,45.

Задание физико-механических параметров PDC-резца в Abaqus

 Edit Material ✕

Name: pdc

Description: 

Material Behaviors

Density

Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other 

Elastic

Type: ▼ Suboptions

Use temperature-dependent data

Number of field variables:

Moduli time scale (for viscoelasticity):

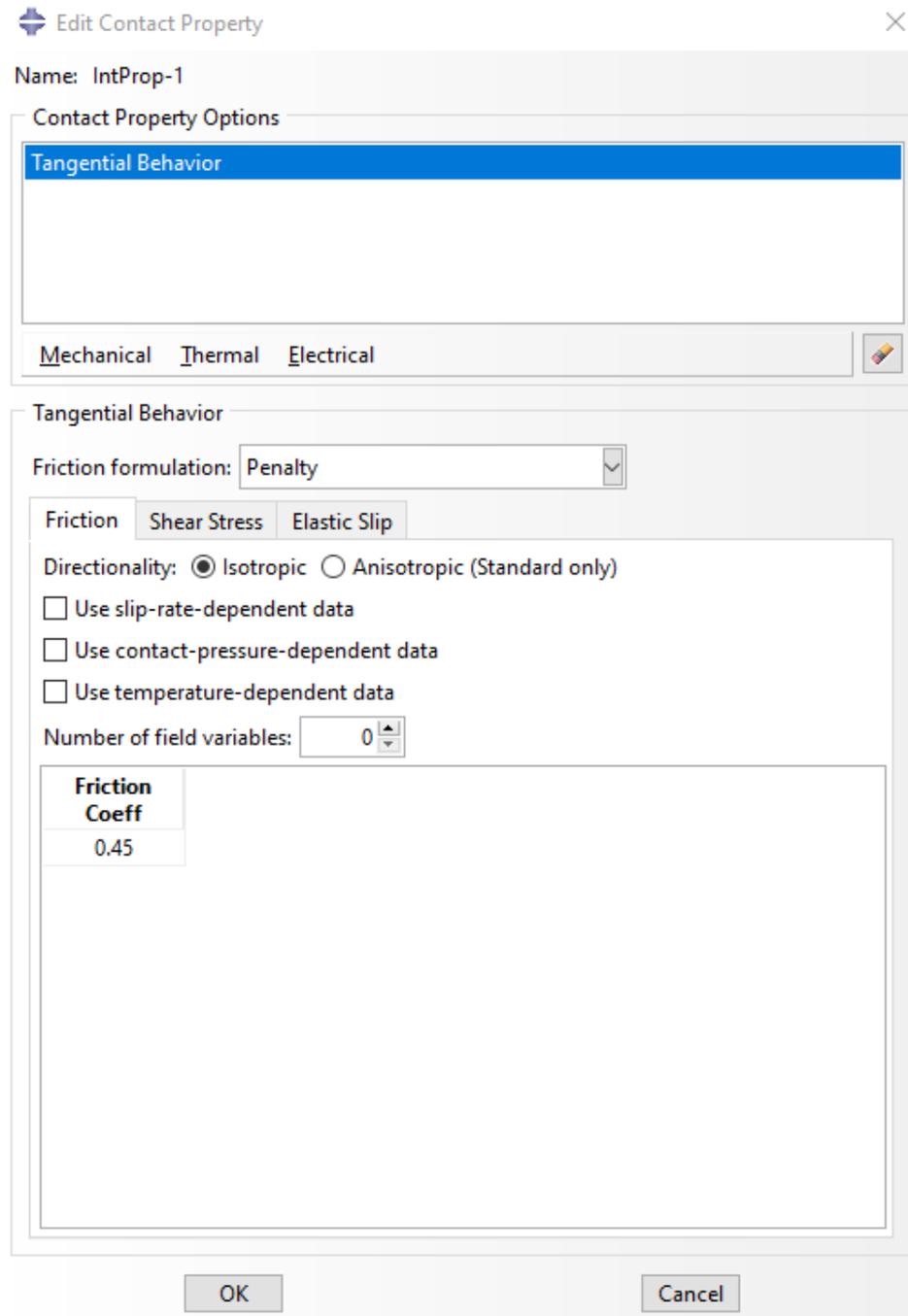
No compression

No tension

Data

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	890000	0.07

Контактное взаимодействие PDC-резца и породы



Контактное взаимодействие PDC-резца и породы в Abaqus Explicit показано выше, в табл. 2.12.

В модели были исследованы режимы PDC-резца резания, представленные в табл. 2.13.

Режимы резания

Параметр	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Скорость резания, м/с	4			
Глубина резания, мм	4			

Наложение граничных условий было выполнено в формулировке Лагранжа. Основание и боковые стенки участка породы были лишены всех степеней свободы. Для PDC-резца была задана скорость резания в направлении одной из осей. По другим осям перемещение не было авторизовано (рис. 2.34).

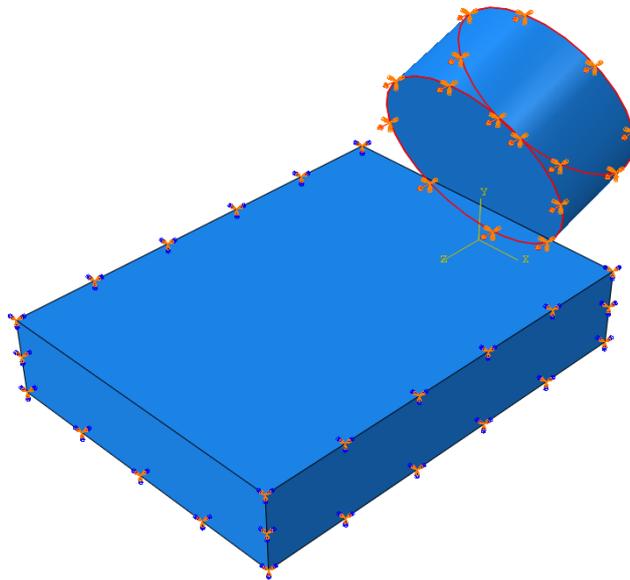


Рис. 2.34. Граничные условия для резца PDC

Расчёт модели выполнялся в модуле Abaqus Explicit, предназначенном для нелинейных переходных динамических процессов, использующих явную схему интегрирования метода конечных элементов (рис. 2.35). Время процесса имитации – 0,015 с. Время расчёта – 5 часов.

Уравнения с частными производными, решаемые в явном анализе динамики, выражают сохранение массы, импульса и энергии в Лагранжевых координатах. Они вместе с материальной моделью и набором начальных и граничных условий определяют полное решение задачи.

Для Лагранжевых формулировок, доступных в настоящее время в явной системе динамики, сетка перемещается и искажается с материалом, который она

моделирует, и сохранение массы автоматически выполняется. Плотность в любой момент можно определить по текущему объему зоны и ее начальной массе:

$$\frac{\rho_0 \cdot V_0}{V} = \frac{m}{V} \quad (2.64)$$

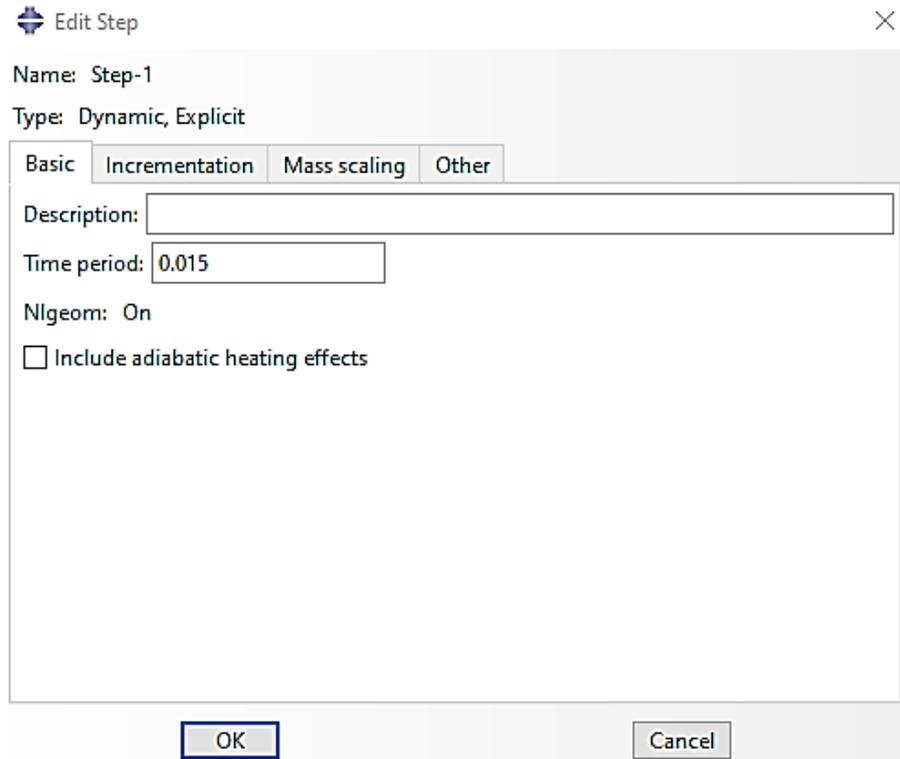


Рис. 2.35. Определение параметров расчёта в Abaqus Explicit

Уравнения в частных производных, выражающие сохранение импульса, связывают ускорение с тензором напряжений:

$$\rho \cdot \ddot{x} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (2.65)$$

$$\rho \cdot \ddot{y} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (2.66)$$

$$\rho \cdot \ddot{z} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2.67)$$

Закон сохранения энергии выражается через:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} \cdot (\sigma_{xx} \cdot \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \cdot \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \cdot \dot{\epsilon}_{zz} + 2 \cdot \sigma_{xy} \cdot \dot{\epsilon}_{xy} + 2 \cdot \sigma_{yz} \cdot \dot{\epsilon}_{yz} + 2 \cdot \sigma_{zx} \cdot \dot{\epsilon}_{zx}) \quad (2.68)$$

Эти уравнения решаются явно для каждого элемента модели на основе входных значений в конце предыдущего временного шага. Малые приращения времени используются для обеспечения стабильности и точности решения.

Заметим, что в явной динамике мы не ищем какой-либо формы равновесия; мы просто берем результаты из предыдущей точки времени, чтобы предсказать результаты в следующей точке времени. Итерация не требуется.

В правильно поставленной задаче явного моделирования динамики масса, импульс и энергия должны быть сохранены. Обеспечивается только сохранение массы и импульса. Энергия накапливается со временем, и ее сохранение проверяется во время решения. Обратная связь по качеству решения обеспечивается с помощью сводок по сохранению импульса и энергии.

Для PDC резца были выбраны свободные тетраэдральные элементы размером 0,5 мм (125571 элементов), а для породы – структурированные гексагональные размером 0,2 мм (1200000 элементов). Тип элементов – 3D Stress, работающие во всех трех направлениях по своему объему в гибридной формулировке.

Были выполнены исследования для определения оптимального значения размеров конечно-элементной сетки по отношению к точности и времени расчёта (рис. 2.36).

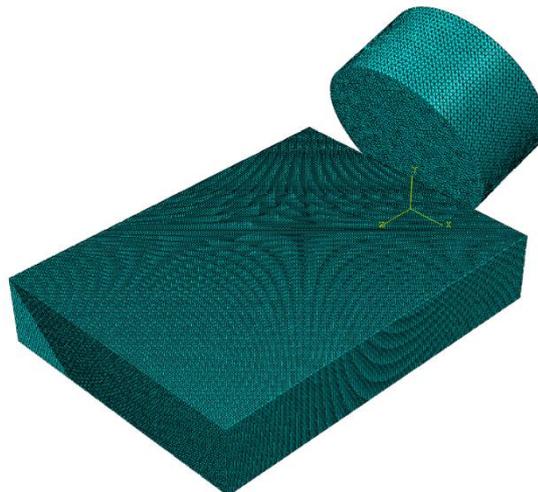


Рис. 2.36. Наложение конечно-элементной сетки

В результате моделирования были получены значения параметров деформации породы, распределения контактных нормальных и касательных напряжений, напряжения по Мизесу, значения сил, а также другие характеристики.

Имитационные модели могут позволить получить зависимости представленных параметров от режимов резания, геометрического положения PDC-резца, её физико-механических свойств, свойств породы, а также их контактного взаимодействия (рисунок 2.37, 2.38, 2.39, 2.40, 2.41).

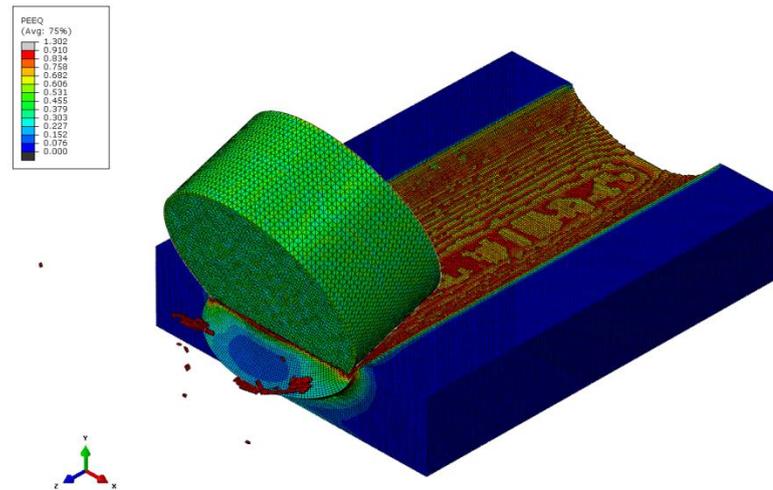


Рис. 2.37. Характер деформация породы при резании PDC-резца

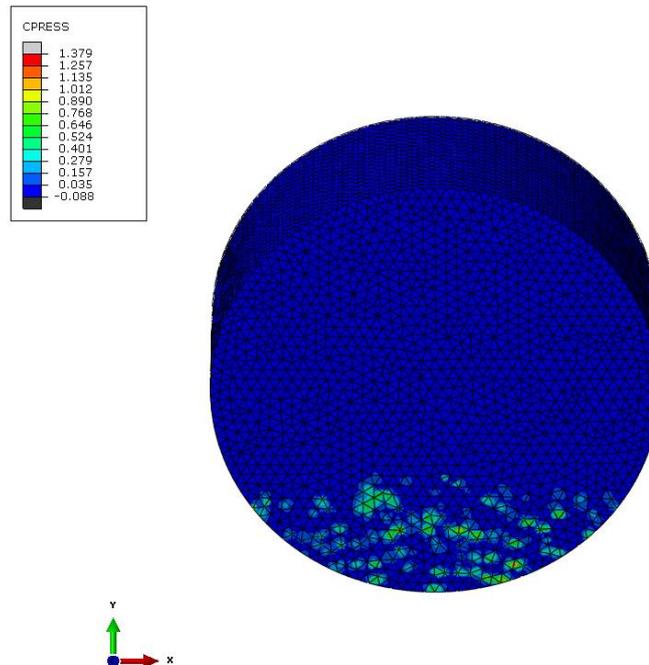


Рис. 2.38. Распределение контактных нормальных напряжений на PDC-резце

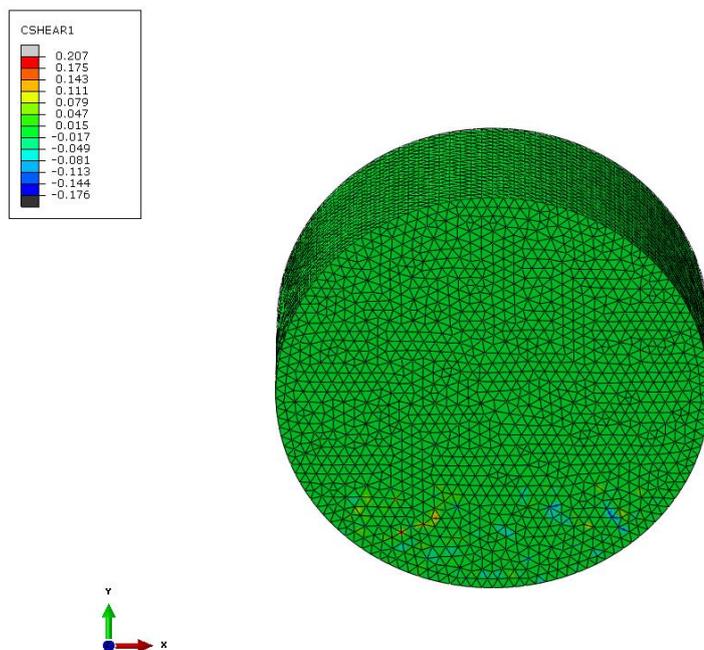


Рис. 2.39. Распределение контактных касательных напряжений на PDC-резце

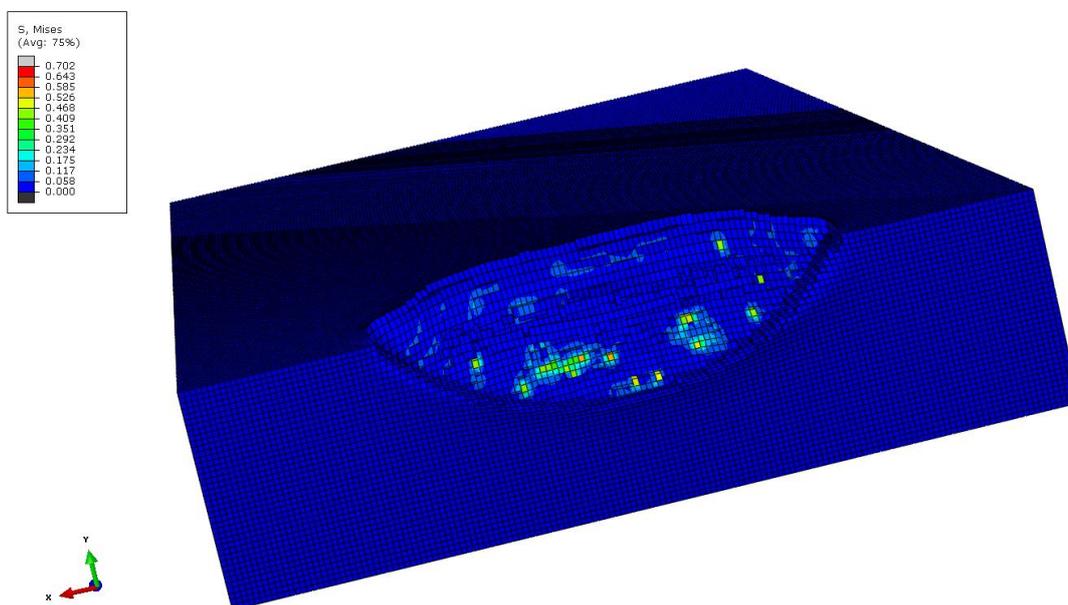


Рис. 2.40. Распределение напряжений по Мизесу в породе

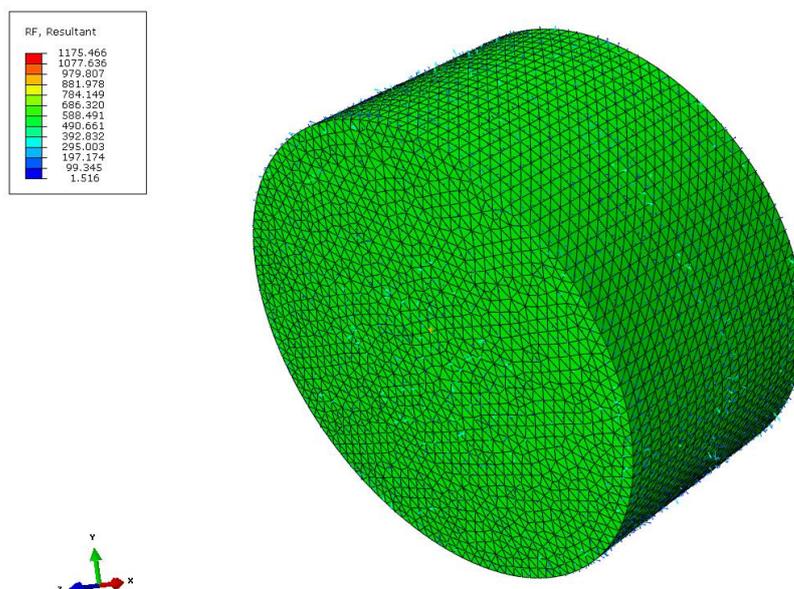


Рис. 2.41. Значения сил на PDC-резце

В оптимизации геометрических параметров PDC-резца, контактного взаимодействия и режима резания ключевой задачей является стремление к равномерному распределению нормальных и касательных напряжений в зоне контакта PDC-резца и породы в целях ликвидации зон с повышенными значениями данных параметров и снижения локального износа, что может являться целевой функцией.

Посредством многофакторного имитационного моделирования формируются матрицы значений для каждой совокупности факторов: параметров режима резания (скорость и глубина резания), контактного взаимодействия (трибологические свойства поверхностного слоя PDC-резца и/или наличие бурового раствора, позволяющего снизить кинематический коэффициент трения) и геометрических параметров резца (геометрическая форма и положение в пространстве). При этом каждый фактор варьируется с фиксированным шагом.

На основе данных матриц получают интерполяционные зависимости, позволяющие не только оптимизировать процесс, но и прогнозировать его для любой заданной точки.

Такая обработка данных может реализовываться в программной среде MathCAD или MATLAB.

Кроме того, стоит отметить, что данная оптимизация должна быть выполнена для каждого интересующего вида пород.

Прогнозирование степени износа PDC-резца осуществляются на основании регрессионных моделей, полученных имитационно-экспериментальным методом.

Имитационные модели для различных варьируемых факторов (геометрия, контактное взаимодействие и режимы резания) с заданным шагом позволяют получить значения напряжений по Мизесу. Таким образом формируется матрица значений для определённой сетки факторов.

Параллельно проводятся аналогичные экспериментальные исследования, где измеряют износ для той же сетки факторов.

На основе сопоставления имитационных и экспериментальных данных получают регрессионную модель зависимости износа от установленных факторов.

Данная модель позволяет в дальнейшем прогнозировать степень износа PDC-резца для различной совокупности факторов.

Также возможно использование уже существующих моделей износа PDC-резца, как, например

$$W = k_2 \cdot V \cdot \sigma^{\frac{1}{b \cdot n'}}, \quad (2.69)$$

где W – величина износа, k_2 – постоянная износа, V – величина деформации, σ – напряжения по Мизесу, b – константа, n' – коэффициент циклического деформационного упрочнения. Для PDC-резца $k_2 \cdot V = 1,5 \cdot 10^{-11}$, $b = 0,5$ [14].

При известных значениях коэффициентов достаточно получить значения напряжений по Мизесу из имитационной модели и посредством представленной зависимости спрогнозировать величину износа.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОЛОТ, АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИНАМИ PDC

3.1. Разработка конструктивных параметров буровых долот

Расширение объемов производства буровых работ во многом зависит от эффективности процесса разрушения горных пород. Создание эффективного бурового инструмента наиболее оптимальной конструкции продиктовано современными требованиями и условиями сложившихся рыночных отношений. Известно, что при бурении скважин значительные материальные затраты, приходится на инструмент, следовательно, создание новых и усовершенствование существующих конструкций, а также технологий их применения являются приоритетными направлениями.

Многие научно-производственные организации, а также видные ученые ведут разработку перспективных конструкций инструмента, а также ресурсосберегающих технологий. Анализ их работ показывает, что при создании породоразрушающего инструмента обычно не учитывают функционально взаимосвязанную систему трех основных составляющих, влияющих на эффективность взаимодействия пары «инструмент-порода». Под основными составляющими функционально взаимосвязанной системы следует понимать конструктивное, структурное и технологическое решение по изготовлению и применению инструмента.

Конструктивное решение – совокупность геометрии, формы рабочего торца инструмента, длины и высоты режущих элементов, их число, ширина, углы установки, а также форма промывочной, системы и т.д.

Структурное решение – композиционный состав материала корпуса долота и режущих элементов, их физико-механические свойства, а также методы и способы изготовления и т.д.

Технологические решения – параметры режимов бурения, их взаимное влияние и другие условия, необходимые, для процесса разрушения породного массива.

Отсюда следует, что при правильно обоснованном выборе конструкции и структуры инструмента, увязанном с технологическими требованиями, можно получить оптимальную конструкцию для заданных условий и эффективное взаимодействие инструмента с забоем.

Известно, что процесс резания горных пород, независимо от категории их твердости, во много раз эффективнее процесса вдавливания, так как затрата энергии при резании растет значительно медленнее, чем увеличение объема отделяемой породы. Следовательно, наиболее эффективным методом разрушения породы является метод резания.

Разработка относится к области бурения скважин долотами режущего типа и может найти применение в горнодобывающей и нефтегазовой отрасли промышленности при бурении скважин различного назначения. Двухъярусное долото режущего типа предназначено для бурения скважин роторным способом с помощью забойных двигателей в породах выше средней крепости и крепких.

Выполнены лабораторные исследования, на основании результатов которых появилась принципиальная возможность разработки конструкции долота с ярусами, имеющими различную частоту вращения.

Техническая реализация этой идеи многообразна. Например, низ бурильной колонны может быть оснащен турбобуром, электробуром или винтовым забойным двигателем и планетарным редуктором. В зависимости от диаметра долота, планетарный редуктор может быть вынесенным за пределы корпуса долота или встроенным в корпус.

Одной из главных причин снижения эффективности буровых долот режущего типа, армированных пластинами PDC, предназначенных для бурения скважин различного назначения, является повышенный износ периферийных скважинообразующих режущих элементов. Создание новых буровых долот с равномерно изнашивающимися режущими элементами по всему контуру долота затруднено, так как отсутствуют научно обоснованные методы выбора их конструктивных параметров. Разработанная методика исследования осевой нагрузки и механической скорости бурения долотами режущего типа позволяет

сформулировать принцип создания многоярусных долот, у которых режущие элементы на пилотном и скважинообразующем ярусах имеют скорости резания, не превышающие критических значений.

Выбор наилучшего породоразрушающего инструмента (ПРИ) для конкретных условий бурения является одной из проблем, с которой приходится сталкиваться нефтегазовым и сервисным компаниям при строительстве скважин [27, 74]. В настоящее время промышленность выпускает большую линейку долот, используемых непосредственно при бурении скважин различного назначения.

При проектировании долот, армированных пластинами PDC используются следующие элементы дизайна: конфигурация долот (высота и толщина долота, количество, направление и глубина промывочных окон, материал долота; характеристика резцов их количество, расстояние между ними, размер резцов, угол атаки, угол бокового наклона резца; интерфейс основного резца PDC (конфигурация, состав, форма). Исходя из вышеизложенного и с целью оптимального проектирования, нами предложен дизайн алгоритма работы долот, армированных PDC (рис. 3.1).

Детальное изучение дизайна буровых долот позволило приступить к моделированию в натуральную величину оптимального стабилизирующего, антивибрационного долота.

Выбор ПРИ для бурения горных пород любой категории по буримости подразумевает определенный компромисс. Инструмент с синтетическими поликристаллическими алмазами эффективно бурит породы средней и выше средней категории по буримости, но выходит из строя в абразивных, трещиноватых породах, что резко снижает эффективность бурения.

Долота с природными алмазами имеют более высокие показатели по механической скорости бурения, служат дольше, но их выбор ограничен для перемежающихся пород, где породы мягких прослоев чередуются со средними и твердыми, что приводит к снижению эффективности бурения.

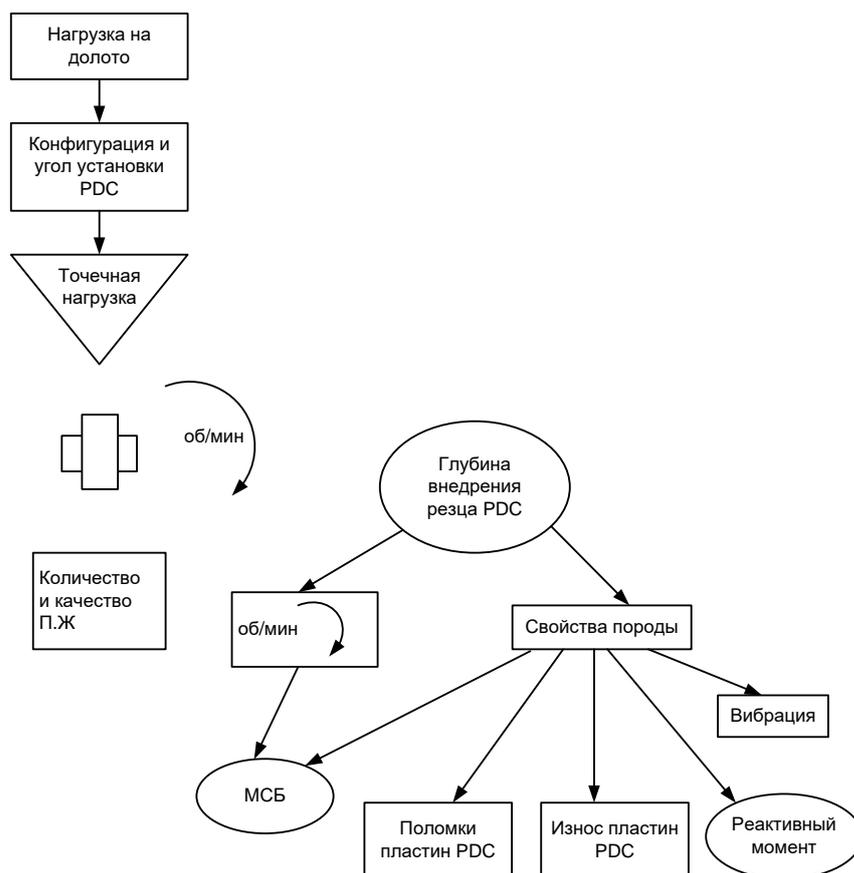


Рис. 3.1. Дизайн алгоритма работы долот, армированных пластинами PDC:

МСБ – механическая скорость бурения, П.Ж – промывочная жидкость

Сегодня буровики хотели бы иметь долота, способные бурить скважину на всю глубину без их замены, то есть этакий «всепогодный» породоразрушающий буровой инструмент, который может одинаково хорошо бурить горные породы от I до XII категории по буримости включительно. К сожалению, это пока только мечты, и над созданием такого ПРИ работают многие специалисты и промышленные предприятия всего мира, понимая при этом, что применение подобного инструмента способствовало бы сокращению числа спускоподъемных операций (СПО) и, как результат, резкому повышению механической скорости бурения.

Породоразрушающий инструмент составляет до 5 % от общей стоимости скважины, но является основным компонентом экономики сооружения скважины. Для бурения неглубоких скважин могут быть использованы долота не очень дорогие, достаточно простых конструкций. При бурении глубоких

скважин экономически выгодней применять усовершенствованные долота, армированные алмазно-твердосплавными пластинами (PDC) с высокой механической скоростью проходки и большим сроком службы [26, 73]. Стоимость такого инструмента многократно окупается, прежде всего, за счет сокращения СПО.

Улучшение качества ПРИ в последнее время стало возможным благодаря применению современных материалов и технологий производства в сочетании с конструктивным улучшением динамики промывочной жидкости. Усовершенствование гидравлики долот и режущего вооружения позволило получить более совершенную конструкцию породоразрушающего инструмента с фиксированными резами. Компьютерное моделирование динамики промывочной жидкости позволило внести изменения в известную конструкцию инструмента и повысить производительность буровых работ. Современные программы проектирования буровых работ позволяют корректировать подбор породоразрушающего инструмента в зависимости от крепости горных пород.

В последнее время при производстве высокоэффективных буровых долот все более широкое применение находят композиционные материалы и комбинированные породоразрушающие элементы (твердый сплав + поликристаллические алмазы), износостойкость которых в десятки раз выше, чем у вольфрамокобальтовых сплавов (в США – «Стратапакс», DPC, DPI, в России – ДАП ОАО НПО «Буровая техника», НПП «Азимут», а также долота типа ИСМ опытного завода ИСМ АН Украины). Появилась возможность расширить область вращательного бурения долотами режуще-скалывающего типа по породам выше средней крепости и крепкие, соответствующие VI и частично IX категориям по буримости, для бурения которых традиционно применялись шарошечные долота. Новый инструмент, вооруженный алмазно-твердосплавными пластинами (PDC), должен был полностью вытеснить из буровой практики дорогостоящие алмазные долота. Однако этого не произошло. Более того, именно в твердых и крепких породах, для которых предназначался

этот инструмент, традиционные алмазные долота по-прежнему более эффективны [11, 13, 14].

Известен ряд конструкций долот режуще-истирающего типа (РИД), имеющих несколько лопастей (от двух до шести), на которых по линиям резания размещены твердосплавные или алмазно-твердосплавные режущие элементы, образующие в совокупности вооружение долота. Достоинством таких долот является простота конструкции. К недостаткам следует отнести наличие весьма высокого момента сопротивления вращению и усилию подачи за счет ступенчатой конструкции долота, что естественно приводит к снижению механической скорости бурения. Принятая схема армирования лопастей твердым сплавом не обеспечивает полного перекрытия забоя скважины, сохранения на необходимое время диаметра долота и вызывает быструю изнашиваемость периферийных режущих элементов. Выходящая из насадок долота промывочная жидкость не обладает достаточно высокой турбулентной активностью, что сказывается на качестве очистки забоя от крупного шлама.

Несвоевременно поднятый вверх по стволу скважины шлам попадает под лопасти долота и повторно измельчается, все это значительно снижает механическую скорость бурения, увеличивает износ твердосплавных элементов, способствует изменению диаметра и вертикальности ствола скважины.

В породах средней крепости, часто перемежающихся пластинчатыми абразивными породами, ступенчатые РИД применяются для бурения скважин роторным и турбинным способом. При бурении мягких и вязких пород долото работает как режущий инструмент, срезая породу своими лопастями. Встречая твердые и крепкие прослойки, долото начинает работать как истирающее (происходит процесс микрорезания).

Существенный прирост технико-экономических показателей бурения достигается за счет совершенствования буровых долот, что является одним из магистральных направлений развития буровой техники. Повышение стойкости и производительности долот позволяет в гораздо большей степени влиять на эффективность процесса бурения, нежели совершенствование какой-либо

вспомогательной системы. В последнее время при производстве высококачественных буровых долот все более широкое применение находят композитные материалы, комбинированные породоразрушающие элементы (твердый сплав + поликристаллические алмазы). Сейчас принято считать, что в области совершенствования породоразрушающего инструмента основным направлением является развитие машиностроительных технологий и материалов и что резервы его конструкционного совершенствования практически полностью исчерпаны. Однако анализ современных конструкций долот отечественного и зарубежного производства и результаты выполненных нами работ позволяют заявить о создании новых усовершенствованных конструкций буровых долот повышенной эффективности.

Рассмотрим конструкцию известного двухъярусного долота со встречным вращением ярусов типа Д-2ВВ диаметром 215,9 мм. Вращение долота осуществляется за счет забойного двигателя через планетарный редуктор, конструкция которого известна и здесь не приводится. Наличие планетарного редуктора, расположенного выше долота, позволяет вращать ярусы в противоположные стороны с частотами, обратно пропорциональными их диаметрам.

Применение долота позволяет увеличить механическую скорость бурения, предотвратить полностью или значительно уменьшить интенсивность искривления скважин, частично устранить кавернообразование, улучшить качество очистки забоя от шлама, снизить момент сопротивления и усилия подачи. Повышенная износостойкость режущих элементов долота достигается за счет выравнивания скоростей резания на ярусах при их встречном вращении от забойного двигателя через планетарный редуктор.

Долото Д-2ВВ с редуктором (рис. 3.2) имеет форму усеченного конуса и состоит из двух ярусов: пилотного 1 с приводом 2 от забойного двигателя и - скважинообразующего 3 с приводом 4 от планетарного редуктора 5.

На каждом ярусе имеются режущие лопасти 6, состоящие из нескольких режущих элементов 7. z_a и z_b – количество зубьев на центральном колесе и зубчатом венце планетарного редуктора соответственно.

Режущие элементы из алмазно-твердосплавных пластин образуют лопасти ярусов (рис. 3.3).

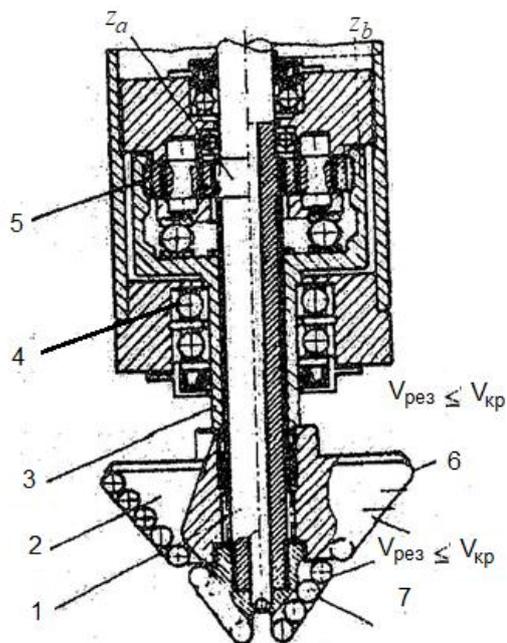


Рис. 3.2. Двухъярусное долото режущего типа Д-2ВВ

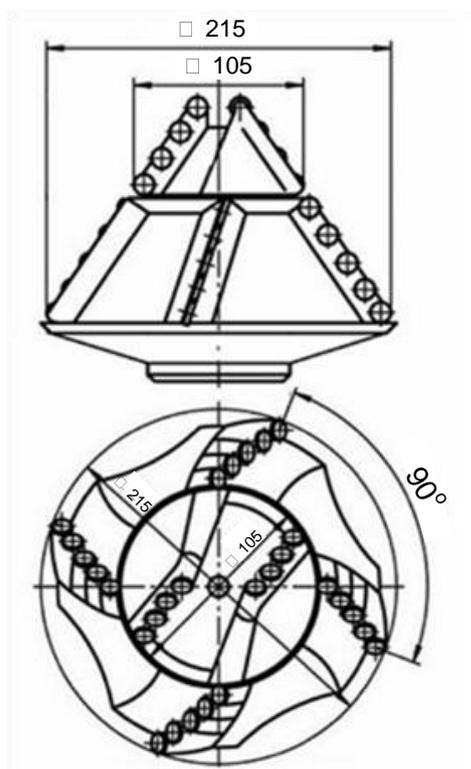


Рис. 3.3. Лопасти ярусов с режущими элементами

Механическая скорость бурения многоярусного долота V , мм/сек, определяется возможной скоростью бурения пилотного яруса:

$$V_c = S_{\pi} \cdot n_{\pi} = S_{\pi} / T_{\pi},$$

где S_{π} – подача пилотного яруса за один оборот, мм/об;

n_{π} – частота вращения пилотного яруса, об/сек;

T_{π} – период обращения пилотного яруса, с.

За время одного оборота пилотного яруса T_{π} все долото совершает осевое перемещение S_{π} , а каждая лопасть скважинообразующего яруса за то же время проходит часть своего оборота, срезая стружку толщиной $(h - S_{\pi})$ мм, с механической скоростью бурения $V_{\text{мб}}$.

Для полной обработки забоя скважины за время T скважинообразующим ярусом необходимо, чтобы число лопастей этого яруса определялось зависимостью:

$$z \geq \pi \cdot D / \pi \cdot d, \quad (3.1)$$

где D – большой диаметр пилотного яруса, мм;

d – большой диаметр скважинообразующего яруса, мм.

Каждая лопасть, состоящая из нескольких режущих элементов, на каком бы ярусе она ни находилась, в единицу времени проходит одинаковый путь резания и поэтому имеет одинаковую со всеми лопастями интенсивность изнашивания (долото становится равноизнашиваемым). Лопасты выполнены съемными.

Частота вращения для таких долот устанавливается, исходя из критической скорости резания, которая имеет максимальное значение на периферийных режущих элементах скорости резания на остальных линиях, более близких к оси вращения, ниже критических значений и убывают обратно пропорционально увеличению диаметров окружностей, на которых размещены режущие элементы. Принцип деления долота на независимые в кинематическом отношении части позволяет решить еще две проблемы – снизить до минимума реактивный момент на долоте и повысить эффективность очистки забоя

скважины. Это достигается вращением частей долота в противоположных направлениях.

Работа долота Д-2ВВ на забое осуществляется следующим образом. Жидкость от промывочного насоса, двигаясь через бурильные трубы, забойный двигатель, планетарный редуктор и режущее долото, попадает на забой скважины; охлаждает вращающееся долото и транспортирует продукты разрушения на поверхность. При этом вращение долота осуществляется за счет забойного двигателя через планетарный редуктор с передаточным числом $i_{ab} = z_b/z_a$. Наличие планетарного механизма, расположенного выше долота, позволяет вращать ярусы в противоположные стороны с частотой, обратно пропорциональной их диаметрам.

Кинематическая схема планетарного редуктора позволяет долоту выполнять двойное вращательное действие (движение верхней части долота влево, а нижней – вправо). На забое скважины при ее промывке создается зона повышенного турбулентного режима движения, что способствует более быстрой и качественной очистке от шлама, что способствует увеличению механической скорости бурения.

Мгновенная скорость бурения стабилизирующего двухъярусного долота $V_{мб}$, мм/с, определяется возможной мгновенной скоростью бурения забуривающего яруса:

$$V_{мб} = S_3 \cdot n_3 = \frac{S_3}{T_3}, \quad (3.2)$$

где $V_{мб}$ – мгновенная скорость бурения, мм/с;

S_3 – интенсивность внедрения забуривающего яруса, мм/об;

n_3 – частота вращения забуривающего яруса, об/с;

T_3 – время одного оборота забуривающего яруса, с.

За время T_3 все долото совершает осевое перемещение S_3 , а каждая лопасть забуривающего яруса за это же время проходит часть своего оборота, срезая стружку толщиной $h = S_3$ с мгновенной скоростью бурения $V_{мб}$.

Равенство мгновенных скоростей бурения различных ярусов долота определяется:

$$V_{\text{мб}} = S_3 \cdot n_3 = S_p \cdot n_p = \text{const}, \quad (3.3)$$

где $V_{\text{мб}}$ – мгновенная скорость бурения, мм/с;

S_3 – интенсивность внедрения забуривающего яруса, мм/об;

n_3 – частота вращения забуривающего яруса, об/с;

S_p – интенсивность внедрения (подача) разбуривающего яруса, мм/об;

n_p – частота вращения разбуривающего яруса, об/с, обеспечивается варьированием частоты и интенсивности внедрения, что делает возможным согласовать скорости бурения быстровращающейся внутренней части долота и медленно вращающейся наружной части.

При таких частотах вращения за один оборот забуривающего яруса долото переместится вдоль оси вращения на величину S_p , мм/об, а разбуривающий ярус провернется всего на часть оборота, и для того, чтобы при этом забой был обработан полностью, необходимо на разбуривающем ярусе иметь число лопастей z_p , определяемое зависимостью

$$z_p \geq z_3 \cdot \frac{n_3}{n_p}, \quad (3.4)$$

где z_p – число режущих лопастей разбуривающего яруса;

z_3 – число режущих лопастей забуривающего яруса;

n_3 – частота вращения забуривающего яруса, об/с;

n_p – частота вращения разбуривающего яруса, об/мин.

Величина критической скорости резания $V_{\text{кр}}$ – основное ограничение области применения долот режущего типа на породах выше средней крепости и крепких. Диаметр долота, на котором режущий элемент достигает критической скорости резания при частоте вращения n_3 , называют предельным (диаметр d).

Частота вращения разбуривающего яруса, имеющего наибольший диаметр D определяется как

$$n_p = \frac{d}{D} n_3, \quad (3.5)$$

где n_p – частота вращения разбуривающего яруса, об/мин;

D – предельный диаметр разбуривающего яруса, мм;

d – предельный диаметр забуривающего яруса, мм;

n_3 – частота вращения забуривающего яруса, об/мин.

Режущие элементы забуривающего яруса, расположенные на больших радиусах, будут иметь скорость резания, определяемую зависимостью:

$$V_{рез1} = \frac{\pi \cdot d \cdot n_3}{1000 \cdot 60}, \quad (3.6)$$

где $V_{рез1}$ – скорость резания элементов забуривающего яруса, м/с;

π – 3,14 (математическая константа);

d – предельный диаметр забуривающего яруса, мм;

n_3 – частота вращения забуривающего яруса, об/мин.

Ее величина не превышает критического значения скорости резания.

При передаточном отношении $i = z_b/z_a$ ($i = z_b/z_a + 1$) значительно меньше критического значения

$$V_{рез2} = \frac{\pi \cdot d \cdot n_3}{1000 \cdot 60}, \quad (3.7)$$

где: $V_{рез2}$ – скорость резания элементов разбуривающего яруса, м/с;

π – 3,14 (математическая константа);

d – предельный диаметр разбуривающего яруса, мм;

n_3 – частота вращения забуривающего яруса, об/мин.

Таким образом, долото не имеет значительного износа режущих элементов, наиболее удаленных от оси вращения. Режущие элементы забуривающего и разбуривающего ярусов изнашиваются с одинаковой интенсивностью, за счет чего увеличивается общая наработка на долото.

На основании выполненных исследований [8, 85] было разработано стабилизирующее двухъярусное долото с вмонтированным в его корпус кольцевым постоянным магнитом (рис. 3.5) [43, 80, 90].

Техническим результатом изобретения является уменьшение крутящего момента на буровом ставе и предупреждение возможности возникновения

крутильных колебаний при бурении, вызывающих аномальный износ режущих элементов, улучшение параметров промывочной жидкости, экономия химических реагентов. На данную конструкцию долота получен патент на изобретение (RU № 2695726).

Данная задача решается за счет того, что предлагаемое стабилизирующее двухъярусное долото режуще-скалывающего типа, включающее нижний забуривающий ярус, включающий стабилизаторы нижнего забуривающего яруса и режущие лопасти нижнего забуривающего яруса, верхний разбуривающий ярус, включающий хвостовик, внутренний канал долота, стабилизаторы верхнего забуривающего яруса и режущие лопасти верхнего забуривающего яруса, режущие лопасти нижнего забуривающего и верхнего забуривающего ярусов выполнены симметрично с радиально расположенными режущими элементами, стабилизаторы верхнего разбуривающего яруса оснащены высокостойкими штырями, обладающими калибрующим действием, количество режущих элементов на лопастях нижнего забуривающего яруса равно количеству режущих элементов на лопастях верхнего разбуривающего яруса, в котором соосно оси долота, внутри его, расположен постоянный кольцевой магнит. Режущие элементы на лопастях нижнего забуривающего и верхнего разбуривающего ярусов могут быть выполнены в виде режущих элементов PDC гребнеобразной формы под отрицательным углом от 10° до 35° .

Для работы предлагаемого долота используют забойный двигатель и планетарный редуктор, передающие встречное вращение на нижний забуривающий ярус с угловой скоростью ω_1 и верхний разбуривающий ярус с угловой скоростью ω_2 .

Работает долото следующим образом: при вращении нижнего забуривающего яруса 1 с угловой скоростью ω_1 и верхнего разбурившего яруса 2 с угловой скоростью ω_2 , при осевом перемещении долота режущие лопасти 3 нижнего забуривающего яруса 1 забуриваются в забой, расширяя по мере продвижения скважину до диаметра d , определяемого положением крайних режущих элементов 4 нижнего забуривающего яруса 1, расположенных в

верхних частях режущих лопастей 3 нижнего забуривающего яруса 1, а режущие лопасти 5 верхнего разбуривающего яруса 2 с режущими элементами 6 верхнего разбуривающего яруса 2, расширяют скважину по мере продвижения до диаметра D , определяемого положением крайних режущих элементов 6 верхнего разбуривающего яруса 2, стабилизаторы 7 нижнего забуривающего яруса 1 и стабилизаторы 8 верхнего разбуривающего яруса 2 увеличивают площадь контакта со стенками скважины.

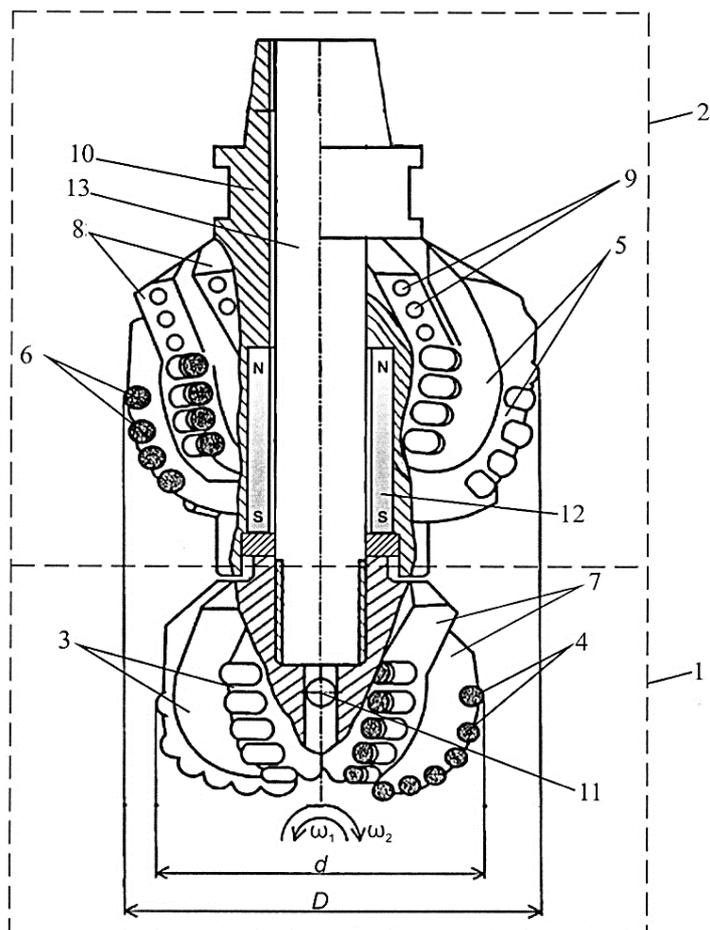


Рис. 3.5. Стабилизирующее двухъярусное режуще-скалывающее долото

Крутящие моменты на нижнем забуривающем и верхнем разбуривающим ярусах направлены встречно и равны по модулю. Это позволяет предупредить возникновение крутильных колебаний, которые являются одной из основных причин возникновения аномального износа PDC.

Для предупреждения возникновения крутильных колебаний необходимо освободить буровой став от передачи крутящего момента от долота. Это возможно если крутящий момент на нижнем забуривающем ярусе и на верхнем

разбуриваемом ярусе будут равны по модулю, но противоположно направлены, для этого количество режущих элементов на нижнем забуриваемом ярусе должно быть равно количеству режущих элементов на верхнем разбуриваемом ярусе. Приближая по модулю значения крутящих моментов на забуриваемом и разбуриваемом ярусах можно предупредить возникновение крутильных колебаний на буровом стае и уменьшить вероятность аномального износа PDC от ударов, возникающих при крутильных колебаниях.

Инновационные резцы PDC нового поколения гребнеобразной формы значительно повышают ударную прочность долота и механическую скорость проходки. Гребнеобразная форма резца PDC повышает эффективность режущей силы и теплоотдачу при более высоком сопротивлении фронтальным нагрузкам на резец, что обеспечивается за счет увеличения на 70 % толщины алмазного слоя на гребне, по сравнению со стандартным резцом PDC. Уменьшение усилия на резец для достижения той же скорости проходки ведет к более стабильному и меньшему крутящему моменту, и улучшенному контролю ориентации долота при наклонно-направленном бурении. Это преимущество позволяет увеличивать интенсивность набора зенитного угла при более высокой механической скорости проходки, тем самым увеличивая интервал продуктивной зоны и минимизирует непродуктивное время, выдерживая более точную траекторию скважины, Стендовые испытания долот, армированных PDC гребнеобразной формы, позволили достичь увеличения механической скорости проходки по сравнению с долотами, армированными стандартными PDC при одинаковых конструкциях долота, что обеспечивает сокращение времени бурения и снижение расходов на строительство скважин.

Задачей разработки антивибрационного двухъярусного долота является увеличение наработки на долото по перемежающимся горным породам от I до IX категории по буримости при сохранении вертикальности ствола скважины, а также уменьшение степени вибрации на забое. Техническим результатом разработки является уменьшение крутящего момента на буровом стае и

предупреждение возможности возникновения крутильных и продольных колебаний при бурении, вызывающих аномальный износ режущих элементов.

Данная задача решается за счет того, что антивибрационное двухъярусное долото, включающее нижний забуривающий ярус, включающий стабилизаторы нижнего забуривающего яруса и режущие лопасти нижнего забуривающего яруса, верхний разбуривающий ярус, включающий хвостовик, внутренний канал долота, стабилизаторы верхнего забуривающего яруса и режущие лопасти верхнего забуривающего яруса, режущие лопасти нижнего забуривающего и верхнего забуривающего ярусов выполнены симметрично с радиально расположенными режущими элементами, стабилизаторы верхнего разбуривающего яруса оснащены высокостойкими штырями, обладающими калибрующим действием, количество режущих элементов на лопастях нижнего забуривающего яруса равно количеству режущих элементов на лопастях верхнего разбуривающего яруса. Режущие элементы на лопастях нижнего забуривающего и верхнего разбуривающего ярусов могут быть выполнены в виде режущих элементов PDC плоской и конусообразной, а лопасти верхнего и нижнего ярусов долота расположены под углом от 15 до 20° и расположены по прямой линии к продольной оси долота.

Сущность изобретения поясняется на рис. 3.6, где представлено: антивибрационное двухъярусное долото, включающее нижний забуривающий ярус 1, включающий стабилизаторы 7 нижнего забуривающего яруса 1 и режущие лопасти 3 нижнего забуривающего яруса 1, верхний разбуривающий ярус 2, включающий хвостовик 10, внутренний канал долота 13, стабилизаторы 8 верхнего разбуривающего яруса 2 и режущие лопасти 5 верхнего разбуривающего яруса 2, режущие лопасти 3 нижнего забуривающего яруса 1 и режущие лопасти 5 верхнего разбуривающего яруса 2 выполнены симметрично с радиально расположенными режущими элементами 4 нижнего забуривающего яруса 1 и режущими элементами 6 верхнего разбуривающего яруса 2, стабилизаторы 7 нижнего забуривающего яруса 1 и стабилизаторы 8 верхнего разбуривающего яруса 2 представляют собой цилиндрические калибрующие

поверхности, стабилизаторы 8 верхнего разбуривающего яруса 2 оснащены высокостойкими штырями 9, обладающими калибрующим действием, промывочные отверстия 11 расположены в нижнем забуривающем ярусе 1 долота.

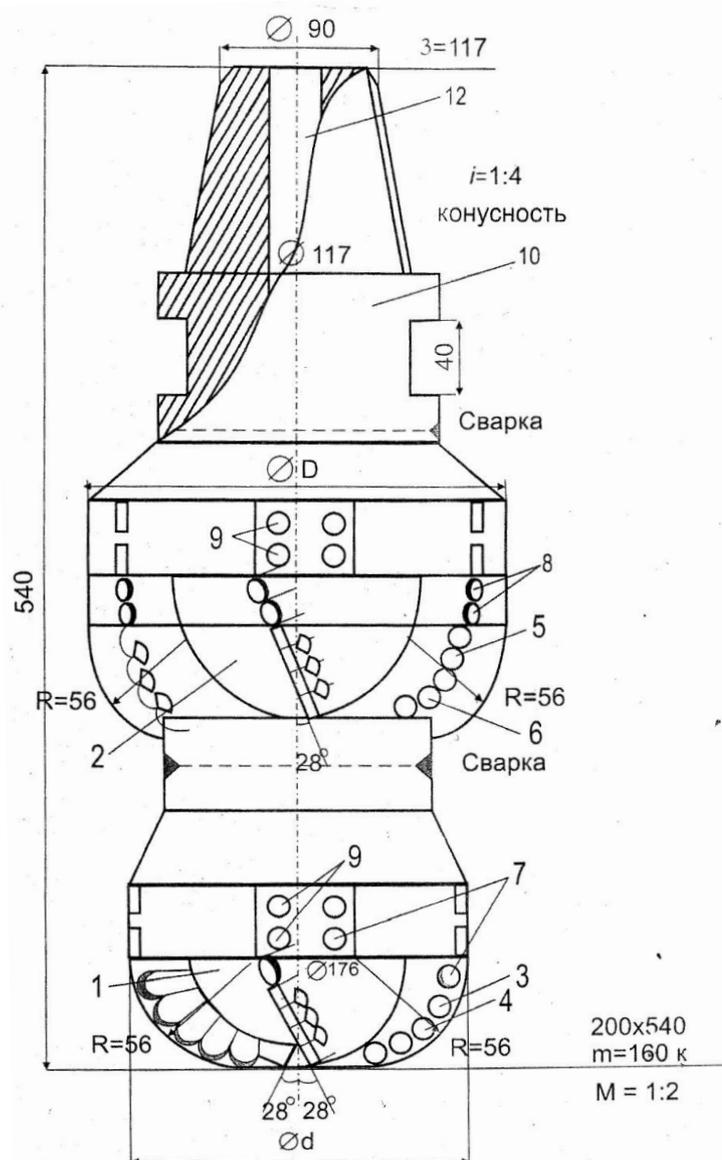


Рис. 3.6. Схема долота, армированного пластинами PDC

Количество режущих элементов 4 на лопастях 7 нижнего забуривающего яруса 1 равно количеству режущих элементов 6 на лопастях 5 верхнего разбуривающего яруса 2. Частным случаем выполнения режущих элементов 4 и 6 могут быть алмазно-твердосплавные пластины (АТП), Polycrystalline Diamond Compact (PDC) гребнеобразной формы или подобные им установленные под отрицательным углом от 10 до 20°.

Схема установки резцов PDC показана на рис. 3.7 и рис. 3.8.

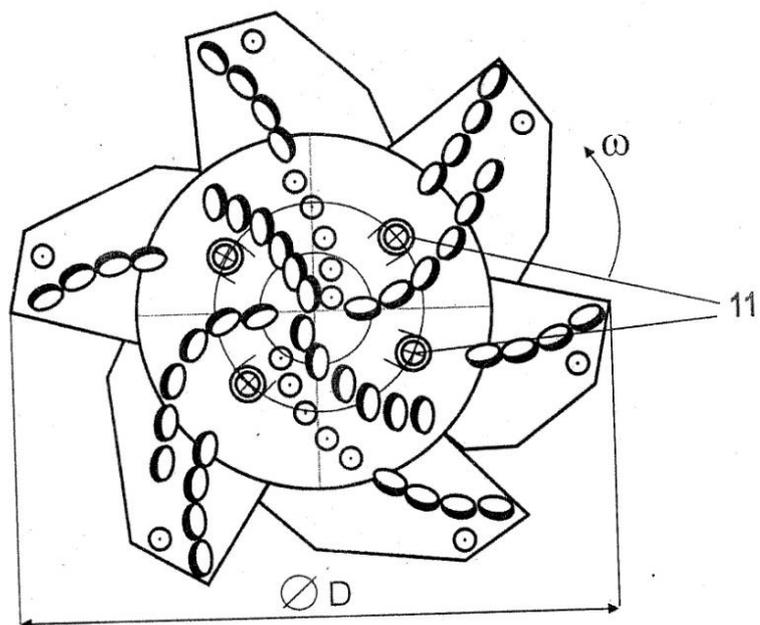


Рис. 3.7. Схема установки резцов PDC

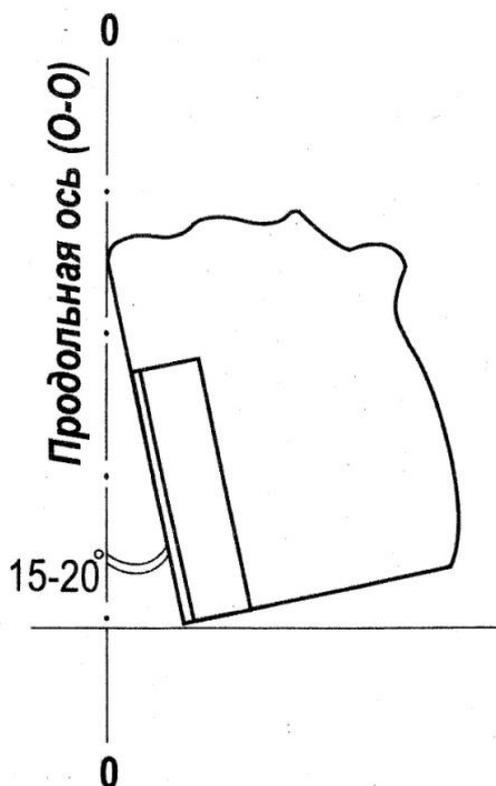


Рис. 3.8. Схема установки резцов PDC

Работает долото следующим образом: При вращении лопасти 3 нижнего забуривающего яруса 1 забуриваются в забой, расширяя по мере продвижения

скважину до диаметра d , определяемого положением крайних режущих элементов 4 нижнего забуривающего яруса 1, расположенных в верхних частях режущих лопастей 3 нижнего забуривающего яруса 1, а режущие лопасти 5 верхнего разбуривающего яруса 2 с режущими элементами 6 верхнего разбуривающего яруса 2, расширяют скважину по мере продвижения до диаметра D , определяемого положением крайних режущих элементов 6 верхнего разбуривающего яруса 2, стабилизаторы 7 нижнего забуривающего яруса 1 и стабилизаторы 8 верхнего разбуривающего яруса 2 увеличивают площадь контакта со стенками скважины, нижнем забуривающем и верхнем разбуривающем ярусах направлены. Это позволит предупредить возникновение крутильных колебаний, которые являются одной из основных причин возникновения аномального износа пластин PDC [84].

Применение PDC конусообразной формы, выполняющих роль амортизаторов, значительно повышают ударную прочность долота и скорость проходки. Конусообразная форма резца PDC повышает эффективность режущей силы и теплоотдачу при более высоком сопротивлении фронтальным нагрузкам на резец, что обеспечивает более эффективную работу его по сравнению с стандартным резцом PDC. Уменьшение усилия на резец для достижения той же скорости проходки ведет к более стабильному и меньшему крутящему моменту, и улучшенному контролю ориентации долота при наклонно-направленном бурении. Это преимущество позволяет увеличивать интенсивность набора зенитного угла при более высокой механической скорости проходки, тем самым увеличивая интервал продуктивной зоны и минимизируя непродуктивное время, выдерживая более точную траекторию скважины.

Применение именно такой конструкции долота, когда резцы типа PDC конусообразной формы располагаются во втором ряду между основными режущими резцами плоской формы в линиях резания горной породы, позволяет уменьшить степень вибрации, крутящий момент на буровом стае, предупредить возможность возникновения крутильных и продольных колебаний, вызывающих аномальный износ режущих пластин PDC.

Антивибрационное двухъярусное долото, включающее нижний забуривающий ярус, включающий стабилизаторы нижнего забуривающего яруса и режущие лопасти нижнего забуривающего яруса, верхний разбуривающий ярус, включающую хвостовик, внутренний канал долота, стабилизаторы верхнего разбуривающего яруса и режущие лопасти верхнего разбуривающего яруса, режущие лопасти нижнего забуривающего яруса и режущие лопасти верхнего разбуривающего яруса выполнены симметрично с радиально расположенными режущими элементами нижнего забуривающего яруса и режущими элементами верхнего разбуривающего яруса, стабилизаторы верхнего разбуривающего яруса оснащены высокостойкими штырями, обладающими калибрующим действием, промывочные отверстия расположены в нижнем забуривающем ярусе долота, при этом количество режущих элементов на лопастях нижнего забуривающего яруса равно количеству режущих элементов на лопастях верхнего разбуривающего яруса, отличающееся тем, что режущие лопасти нижнего забуривающего яруса и режущие лопасти верхнего разбуривающего яруса выполнены по прямой линии под углом от 15 до 20 градусов к продольной оси долота. Антивибрационное двухъярусное долото, отличающееся от известных тем, что с целью гашения вибрации от крутильных и продольных колебаний долота, вызывающих аномальный износ резцов, за режущими резцами PDC с плоской передней гранью установлен второй ряд резцов PDC с выпуклой конусообразной формой, расположенных в линиях резания между плоскими резцами PDC, а промывочные отверстия или насадки расположены строго под прямым углом в сторону к лопастям на которых расположены режущие элементы PDC.

Разработанные компанией «Шлюмберже» высокотехнологичные алмазно-твердосплавные пластины гребнеобразной и конической формы показаны на рис. 3.9 и 3.10.



Рис. 3.9. Алмазно-твердосплавные пластины гребнеобразной формы



Рис. 3.10. Алмазно-твердосплавные пластины конической формы

Разработанное нами антивибрационное двухъярусное долото показывает повышенную стойкость, не подвержено вибрациям на забое, работают как от обычных винтовых забойных двигателей (ВЗД), так и от турбобура и ротора бурового станка.

Двухъярусное долото работает без эксцентричного калибратора, который применяют для нормализации ствола скважины, как при бурении, так и после него при СПО.

Для сокращения времени на эти операции двухъярусное долото позволяет улучшить геометрию ствола скважины непосредственно во время бурения, использование его сокращает время строительства скважины и, как следствие, ее стоимость. В отличие от концентрических калибраторов двухъярусные долота разрушают уступы на участках искривления, а также обеспечивают номинальный диаметр скважины в интервалах переслаивания горных пород различной категории по буримости, особенно при бурении глинистых пучащих горных пород.

При бурении обычными долотами, армированными пластинами PDC, вязких, пластинчатых пород происходит падение механической скорости проходки без износа режущей структуры. При их бурении шлам имеет форму длинной и пластинчатой ленты, она достигает корпуса долота и сжимается. Это приводит к ухудшению очистки и может вызвать шламование породоразрушающего инструмента. Применение двухъярусных долот решает эту проблему и, как результат, способствует повышению скорости бурения. Кроме того, алмазная пластина имеет 2 мм алмазный слой, что позволяет повысить его прочность и стойкость к ударным нагрузкам. Это особенно актуально при сооружении скважин на месторождениях, где встречаются в разрезе переслаивающиеся мягкие и твердые горные породы, что приводит к значительному искривлению скважин.

Антивибрационное двухъярусное долото армируется гребнеобразными и коническими пластинами PDC. Специально спроектированные режущие алмазно-твердосплавные пластины гребнеобразной и конической формы обладают возможностями недоступными стандартным пластинам PDC. Пластины нового поколения гребнеобразной формы значительно повышают ударную прочность долота и механическую скорость бурения, при этом сочетает срезающее действие стандартной пластины PDC и ее дробящее действие. Новейшая форма пластины повышает эффективность режущей силы и теплоотдачу при более высоком сопротивлении фронтальным нагрузкам на саму пластину, что обеспечивается за счет увеличения толщины алмазного слоя на гребне на 70 % по сравнению с толщиной стандартной пластины PDC, комбинации различных размеров гранул поликристаллических алмазов и оптимизации применяемых материалов. гребнеобразная пластина имеет более высокую надежность и улучшенный износ при максимальной проходки на протяжении всего рейса. Долота, армированные пластинами гребнеобразной формы, более устойчивы к ударным и вибрационным нагрузкам. Более толстый алмазный слой пластины обеспечивает максимальную прочность и долговечность долот. Уменьшение усилия на пластину гребнеобразной формы для достижения той же скорости проходки ведет к более

стабильному и меньшему крутящему моменту, и улучшенному контролю ориентации долота при наклонно-направленном бурении.

Долота, армированные PDC, известны своей гидравлической эффективностью. Во многом такая эффективность их достигается уникальной формой, профилем и конструкцией гидромониторных насадок. Гидравлические потоки способствуют увеличению механической скорости бурения, если буровой шлам вовремя удаляется с забоя скважины [6]. Если эффективность промывки невысокая, то буровой шлам повторно попадает под резцы PDC и только после этого транспортируется по стволу скважины на поверхность. Гидравлические потоки, выходящие из насадок, охлаждают долото и защищают его от тепловых повреждений. При этом основное гидравлическое уравнение имеет вид:

$$H = \frac{Pg}{1,714}, \quad (3.8)$$

где: H – сила гидравлического воздействия на забой; P – давление потока жидкости, кПа; g – скорость потока жидкости, л/мин; 1,714 – коэффициент перевода давления и скорости потока жидкости в силу.

Для определения параметров гидромониторного воздействия на забой из слоистых пород рассмотрим известные значения скорости и давления струй гидромониторных долот.

Эффективно разрушают забой из слоистых песчаников и известняков струи с начальной скоростью $V_H > 70$ м/с. При истечении жидкости через затопленное отверстие (долото в скважине) скорость струи определяется выражением

$$V_H = \varphi \sqrt{2g\Delta P}, \quad (3.9)$$

где: $\varphi = 0,7-0,8$ – коэффициент скорости; $g = 9,81$ м/с² – ускорение силы тяжести; $\Delta P = P_H - P_{ск}$, $P_{ск}$ – давление в скважине. МВС (метры водяного столба); P_H – давление, развиваемое насосом, МПа (МВС).

Зная расход Q , давление P_n , развиваемое насосом, высоту H столба жидкости в скважине и начальную площадь сечения S , диаметр выходного отверстия гидромониторных струй определяем из формулы расхода:

$$Q = \mu S \sqrt{2g\Delta P}, \text{ л/с.} \quad (3.10)$$

где: $\mu = 0,7$ – коэффициент расхода; S – площадь сечения двух струй с начальным диаметром d (см), см².

$$S = \frac{10^2 Q}{\mu \sqrt{2g\Delta P}}. \quad (3.11)$$

Диаметр выходного отверстия гидромониторных насадок определяется по формуле

$$d = 10 \sqrt{\frac{2S}{\pi}}, \text{ мм.} \quad (3.12)$$

Крутящий момент на долоте определяется по формуле:

$$M_k = Fl \cos \gamma, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.13)$$

где: F – реактивная сила от гидромониторной струи,

$$F = \frac{S}{2} 10^2 \Delta P, \text{ Н} \quad (3.14)$$

где: S – площадь сечения двух струй, м²; ΔP – давление на выходе струи из долота, МПа; l – плечо силы F от оси долота, м; γ – угол наклона гидромониторной струи к плоскости груди забоя, град.

Так, для долота диаметром $D = 215,9$ мм и с расстоянием между струями $l = 0,2$ м при работе насоса с расходом $Q = 50$ л/с и рабочим давлением $P_n = 10$ МПа в скважине на глубине $H = 500$ м крутящий момент будет равен $M_k = 357$ Н·м. Это обеспечит устойчивую работу долота на породах с контактной прочностью $P_k = 450$ МПа с осевым перемещением (подачей) $h = 1$ мм/об.

Важным элементом процесса разработки долог, армированных PDC, является анализ гидравлической конфигурации долота.

Важную роль в динамическом анализе работы долот играют количество и конструкция сменных гидравлических насадок. Наиболее эффективными

являются съемные гидравлические насадки для бурения различных по буримости горных пород (рис. 3.11).

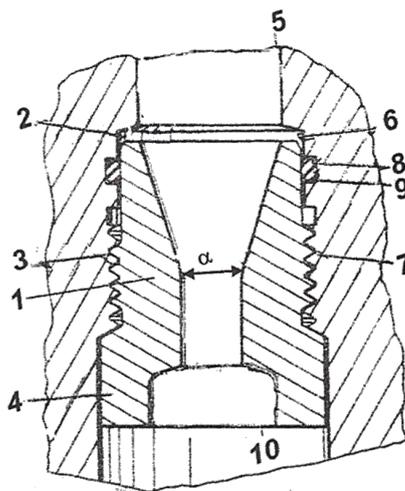


Рис. 3.11. Конструкция сменной гидравлической насадки

Средняя часть гидравлической насадки 1 корпуса 2 выполнена с наружной резьбой α , нижняя 4 – без резьбы и большего диаметра, чем средняя часть 1. В промывочном канате 5 под сопло выполнено расширяющееся книзу гнездо 6 с внутренней резьбой 7 под наружную резьбу 3 сопла. Верхние участки сопла и каната выполнены без резьбы. В верхней части гнезда 6 имеется кольцевая полость 8, в которую вставлено эластичное уплотнительное кольцо 9.

Поперечное сечение нижнего участка 10 внутреннего каната в корпусе 2 сопла имеет форму шестигранника под торцевой ключ. Такая форма нижнего участка способствует быстрой и простой смене сопла. Герметизация снизу обеспечивается за счет плотного взаимного прилегания наклонно выполненных участков корпуса и гнезда под усилием крутящего момента от ключа, сверху – посредством эластичного кольца 9.

Выполненные расчеты показали, что по мягким породам желательно бурить с минимальным давлением и максимальной производительностью насоса, при этом начальная скорость струи V_m должна быть порядка 90 м/с при бурении мягких горных пород по шкале буримости, при бурении средних – $V_m > 70$ м/с, при бурении крепких – $V_m > 50$ м/с.

С целью оценки основных показателей разработанных долот основные их характеристики были сведены в табл. 3.1.

Сравнительные параметры долот, армированных PDC с заявляемым

№ п/п	Наименование качеств долот	Патент № 2310732, двухъярусное долото Д-2ВВ	Патент № 2445433, Стабилизирующее долото режущего типа	Патент № 2694872, Буровое долото	Патент № 2695726, Стабилизирующее двухъярусное режущее скалывающего типа	Подана заявка на изобретение «антивибрационное двухъярусное долото
1	Степень очистки забоя скважины	средняя	средняя	средняя	высокая	высокая
2	Степень вибрации	средняя	средняя	средняя	низкая	самая низкая
3	Степень вертикальной скважины	средняя	средняя	средняя	высокая	самая высокая
4	Наличие гидродинамического эффекта	нет	имеется	имеется	имеется	имеется
5	Аварийность	средняя	средняя	низкая	низкая	очень низкая
6	Наличие технологии «ввинчивания» PDC в забой скважины	нет	нет	имеется	имеется	имеется
7	Величина гидродинамического эффекта	низкая	высокая	высокая	высокая	очень высокая
8	Степень (турбулентность) режима очистки забоя скважины	низкая	высокая	высокая	высокая	самая высокая
9	Возможность бурения трещиноватых горных пород	не желательно	да	да	да	да
10	Износостойкость	средняя	средняя	средняя	высокая	высокая
11	Коэффициент полезного действия долота (КПД)	средний	средний	высокий	высокий	самый высокий
12	Создание эффекта «вязкий клин» на забое скважины	нет	нет	да	нет	нет
13	Степень турбулентности потока жидкости на забое	средняя	средняя	средняя	высокая	самая высокая
14	Наработка на долото	низкая	средняя	высокая	высокая	самая высокая
15	Величина механической скорости бурения	средняя	средняя	высокая	высокая	самая высокая
16	Энергоемкость процесса азрушения	низкая	средняя	средняя	высокая	очень высокая

Таким образом, разработанные нами новые конструкции буровых долот, армированные PDC, позволят сформировать их основные отличительные характеристики:

- Оптимизированный короткий параболический профиль, пригодный для бурения в однородных породах средне мягкой до мягкой крепости.
- Расположение спиральной режущей лопасти обеспечивает долотам большую стабильность во время бурения.
- Эволютное расположение вооружения, асимметричная конструкция долота и сбалансированная нагрузка на долото предотвращают завихрение долота.
- Защита калибровочной части композитными материалами и конструкция с малым моментом увеличивают скорость проходки.
- Гидравлически сбалансированная конструкция, разработанная с помощью вычислительной гидродинамики, приводят к лучшей очистке долот и удалению шлама.
- Использование комбинированных высокопроизводительных гребнеобразных пластин PDC существенно продлевает срок службы долот.
- Высокий угол атаки вооружения как основной, так и на периферийной части, эволютное расположение вооружения, асимметричная конструкция долота и сбалансированная нагрузка на долото предотвращают завихрение долота.
- Основное и периферийное вооружение продлевает срок службы долот.
- Корпус долота выполнен из композитного материала на основе карбида вольфрама, обладающего высокой стойкостью против износа при бурении абразивных пород и эрозионного износа при использовании тяжелых буровых растворов или растворов, имеющих высокое содержание твердых фракций.
- Для формирования режущей структуры используются улучшенные пластины PDC, подобранные в соответствии условиями бурения и обеспечивающими заданные параметры бурения.

– Форма лопастей обеспечивает требования устойчивости и управляемости долота на проектной траектории ствола скважины.

– Опционально устанавливаемые элементы режущей части структуры предотвращают возникновение вибраций.

– Опционально устанавливаемые вторые ряды резцов позволяют бурить сложные интервалы бурения, имеющие перемежающиеся слои пород разной буримости.

– Присоединительная резьба выполняется в соответствии с требованиями API.

– Гидравлика долота обеспечивается установкой сменных насадок и фиксированных портов.

Опции долот, армированных PDC следующие:

– Антивибрационные вставки;

– Антисальниковое покрытие;

– Увеличенное количество гидромониторных насадок в долоте;

– Спиральные лопасти долота;

– Второй ряд зубков PDC на режущей части долота;

– Усиленная защита калибрующей части долота.

– Оптимизация конструкции долот позволяет реализовать бурение скважин с оптимальными значениями осевого усилия и рациональными значениями удельного контактного давления на забой.

– На основании исследования механики разрушения горных пород средней и выше средней категории по буримости обоснована, на уровне изобретений базовая, конструкция долот, способствующая повышению эффективности сооружения скважин.

– В результате проведенных стендовых испытаний разработанный породоразрушающий инструмент показал высокую эффективность при бурении горных пород средней и выше средней категории по буримости.

– Конструктивно долота будут претерпевать изменения, то есть все режущие элементы будут съемными, легкозаменяемыми, а гидравлическая

система будет усовершенствоваться в сторону ее оптимизации, все гидравлические насадки будут съемными. При таком подходе будет увеличиваться механическая скорость бурения скважин, уменьшаться вибрация на забое, улучшаться очистка ствола скважины, нагрузка на долото будет осуществляться более плавно и, как результат, уменьшится удельная стоимость бурения горных пород.

– Оптимизация конструкции долот позволяет реализовать бурение скважин с оптимальными значениями осевого усилия и рациональными значениями удельного контактного давления на забой, при уменьшении боковых перемещений породоразрушающего инструмента.

– На основании исследования механики разрушения горных пород средней и выше средней категории по буримости обоснована, на уровне изобретений базовая конструкция породоразрушающего инструмента, способствующая повышению эффективности сооружения скважин.

– Разработаны оптимальные схемы рабочих торцов долот, отличающиеся различным уровнем функциональных возможностей.

– В результате стендовых испытаний разработанный инструмент показал высокую эффективность при бурении горных пород средней и выше средней категории по буримости.

– Внедрение разработанного породоразрушающего инструмента и технологии его применения в практику буровых работ, позволит добиться увеличения механической скорости бурения долотами в 1,5 раза и проходки на долото на 30 %.

Выполненные исследования по разработке современных конструкций долот, армированных пластинами PDC, позволили сделать следующие выводы:

– оптимизация конструкции долот позволяет реализовать бурение скважин с оптимальными значениями осевого усилия и рациональными значениями удельного контактного давления на забой;

– на основании исследования механики разрушения горных пород средней и выше средней категории по буримости обоснована, на уровне

изобретений, базовая конструкция породоразрушающего инструмента, способствующая повышению эффективности сооружения скважин;

– в результате стендовых испытаний разработанный инструмент показал высокую эффективность при бурении горных пород средней и выше средней категории по буримости;

– впервые предложен такой параметр для породоразрушающего инструмента, как коэффициент полезного действия стабилизирующего двухъярусного долота режущего типа. Он рассчитывается как среднее арифметическое по основным технологическим параметрам: скорости бурения, наработке на долото до полного износа, стоимости долота, износу долота по диаметру, износу пластин PDC, потери пластины PDC.

– если рассматривать в целом, как будут выглядеть буровые долота в ближайшем будущем, представляется, что они будут многофункциональными, прежде всего, в плане оснащения режущей части применительно к категории горных пород по буримости, и обязательно подвержены внешнему воздействию различными физическими и другими полями с целью повышения прочности. При этом конструктивно они будут претерпевать изменения, то есть все режущие элементы будут съемными, легко вменяемыми, а гидравлическая система будет усовершенствоваться в сторону ее оптимизации, все гидравлические насадки будут съемными. При таком подходе будет увеличиваться механическая скорость бурения скважин, уменьшаться вибрация на забое, улучшаться очистка ствола скважины, нагрузка на долото будет осуществляться более плавно и, как результат, уменьшится удельная стоимость бурения горных пород.

3.2. Расчет конструктивных параметров режущей части буровых долот

Расширение объемов производства буровых работ во многом зависит от эффективности процесса разрушения горных пород. Создание эффективного бурового инструмента наиболее эффективной конструкции продиктовано современными требованиями и условиями сложившихся рыночных отношений. Известно, что при бурении скважин значительные материальные затраты приходится на инструмент, следовательно, создание новых и

усовершенствование существующих конструкций, а также технологий их применения являются приоритетными направлениями.

Многие научно-производственные организации, а также видные ученые ведут разработку перспективных конструкций инструмента, а также ресурсосберегающих технологий. Анализ их работ показывает, что при создании породоразрушающего инструмента обычно не учитывают функционально взаимосвязанную систему трех основных составляющих, влияющих на эффективность взаимодействия пары «инструмент–порода». Под основными составляющими функционально взаимосвязанной системы следует понимать конструктивное, структурное и технологическое решение по изготовлению и применению инструмента.

Конструктивное решение – совокупность геометрии, формы рабочего торца инструмента, длины и высоты режущих элементов, их число, ширина, углы установки, а также форма промывочной системы и т.д.

Структурное решение – композиционный состав материала корпуса долота и режущих элементов, их физико-механические свойства, а также методы и способы изготовления и т.д.

Технологические решения – параметры режимов бурения, их взаимное влияние и другие условия, необходимые для процесса разрушения породного массива.

Отсюда следует, что при правильно обоснованном выборе конструкции и структуры инструмента, увязанном с технологическими требованиями, можно получить оптимальную конструкцию для заданных условий и эффективное взаимодействие инструмента с забоем.

Разрушение породы является основной операцией при бурении скважин. В результате силового воздействия породоразрушающего инструмента в породе возникает упругое напряженное состояние. С увеличением нагрузки напряжения в горной породе возрастают и в итоге достигают предельного значения. Дальнейшее повышение нагрузки приведет к разрушению породы либо к пластической деформации. Однако изменение напряжений во времени и

характер протекания деформации во многом зависит от генезиса и кристаллического состава породы. Все горные породы по характеру изменения деформации при внедрении твердого тела (штампа) делятся на следующие группы: хрупкие, пластично-хрупкие, упругопластичные, высокопластичные.

Распределение напряжений в горной породе также зависит от геометрической формы резца, которая может быть представлена в виде цилиндра, сферы, клина или призмы с плоскостью, ограничивающей упругое пространство. Процесс перераспределения напряжений по поверхности контакта резца с породой и переход одного вида деформации в другой с увеличением нагрузки очень сложен.

Предложен метод расчета конструктивных параметров бурового долота, армированного пластинами PDC, позволяющий определять такие важные элементы геометрии режущей части, как рабочие передние и задние углы [2, 18].

Высокая эффективность применения породоразрушающего инструмента, армированного алмазно-твердосплавными пластинами PDC, обеспечивается не только рационально подобранными параметрами режима работы (осевая нагрузка, частота вращения, количество промывочной жидкости), но и его конструктивными особенностями.

В настоящее время нет достаточно четкой научной теории, предназначенной для разработки методов расчета рациональных конструктивных параметров установки PDC на корпусе долота, а это является основным резервом повышения механической скорости бурения и долговечности долота.

Нами рассмотрены вопросы влияния на износостойкость долот, армированных PDC, таких важных элементов геометрии режущей части, как рабочие передний и задний углы. Без правильного понимания этих вопросов невозможно создать эффективные конструкции буровых долот, армированных PDC, обладающих высоким качеством и оптимальной механической скоростью бурения.

Применяемые на долоте пластины PDC имеют диаметр 13,5 мм, толщину алмазного слоя – 2,0 мм. Геометрия и схема установки на корпус позволяют долоту

работать в более стабильном режиме. Пластины PDC крепятся на корпусе долота методом пайки с применением установки ТВЧ, с использованием специального флюса и припоя. Преимущество данных пластин состоит в том, что они в процессе работы не меняют контактную площадь режущего элемента (резца) с забоем, самозатачиваются и имеют 100 % отработку алмазного слоя.

Анализ состояния отработанных буровых инструментов, армированных PDC показывает, что значительная часть (до 30 %) аномального износа резцов происходит от действия сил по задней грани. PDC чаще всего – круглые цилиндры. Угол заострения δ° таких пластин равен 90° , а передний β° и задний α° взаимосвязаны. От величины переднего угла β зависит усилие резания $F_{рез}$ и формирование сколов породы. От величины заднего угла α зависит значение осевой нагрузки и формирование площадки затупления $F_{зат}$.

На основании анализа кинограмм при бурении и строгании с различной толщиной срезаемого слоя породы была предложена расчетная схема к математическому описанию процесса резания-скалывания, представленная на рис. 3.12.

При бурении скважины все режущие элементы буровых инструментов движутся по винтовым траекториям (рис. 3.13) различной крутизны с углами наклона

$$\psi = \arctg \frac{h}{2\pi Ri}, \quad (3.15)$$

где h – толщина срезаемого слоя породы за один оборот, мм;

Ri – радиус установки режущего элемента, мм.

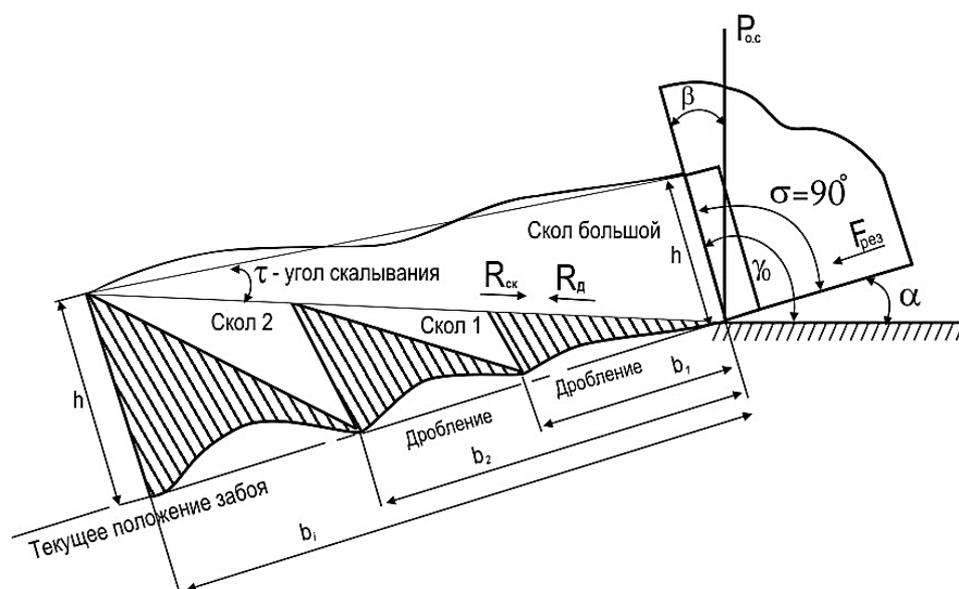


Рис. 3.12. Схема сил и разрушения горной породы резцом PDC при бурении

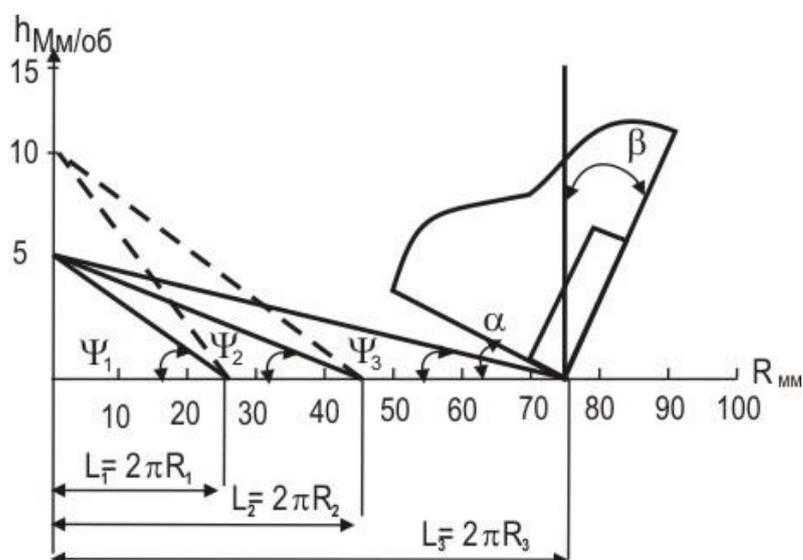


Рис. 3.13. Углы наклона ψ винтовых траекторий PDC, установленных на разных радиусах:

сплошными линиями показаны траектории для $h = 5$ мм,

пунктиром показаны траектории для $h = 10$ мм

При равенстве углов ψ и α произойдет посадка режущего элемента на заднюю грань, и процесс резания-скалывания станет невозможным. Кроме того, посадка на заднюю грань приводит к аномальному износу PDC от действия сил по задней грани. Поэтому всегда при оптимизации проектирования буровых инструментов с PDC необходимо чтобы задний угол α всегда был больше ψ , т.е.

$$\alpha \gg \psi = \arctan \frac{h}{2\pi Ri}.$$

Часто значение заднего угла увеличивают для уменьшения роста площадки затупления. В центральной части долота скорости резания, определяемые зависимостью [55]:

$$V_{\text{рез}} = \frac{\pi D \Pi}{1000 \cdot 60}, \text{ м/с} \quad (3.16)$$

крайне малы, и между двумя симметрично расположенными PDC образуется столбик породы. Если диаметр столбика $d \leq 8 \div 10$ мм, то он периодически скалывается под влиянием поперечных колебаний инструмента. Если диаметр столбика $d > 10 \div 12$ мм, то для его скалывания на оси долота устанавливают PDC с выпуклой поверхностью (конусной или гребнеобразной). Диаметр такой PDC определяет крутизну винтовой траектории центральных PDC и угла ψ_{max} .

На рис. 3.13 показаны углы наклона винтовых траекторий резания-скалывания PDC, установленных на разных радиусах R от оси бурового инструмента в зависимости от толщины h срезаемого слоя породы за один оборот.

Видим, что с увеличением h – толщины срезаемого слоя породы, увеличивается ψ . Для определения предельных значений h в зависимости от режима бурения и свойств породы воспользуемся установленной нами зависимостью механической скорости бурения $V_{\text{мб}}$ от осевой нагрузки $P_{\text{ос}}$ и свойств породы [5, 17]:

$$V_{\text{мб}} = V_0 \frac{P_{\text{уд}}}{P_{\text{к}}} = V_0 \frac{P_{\text{ос}}}{F_{\text{зат}} \cdot P_{\text{к}}}, \text{ мм/с}, \quad (3.17)$$

где $V_0 = 4270/P_{\text{к}}$ – модуль скорости бурения, мм/с;

$P_{\text{ос}}$ – осевая нагрузка, Н;

$F_{\text{зат}}$ – площадка затупления PDC, мм²;

$P_{\text{к}}$ – контактная прочность породы, МПа.

Тогда, выражая механическую скорость бурения через h толщину срезаемого слоя породы за оборот в мм и n , об/мин, частоту буровых инструментов, получим

$$V_{\text{мб}} = n \cdot h = V_0 \frac{P_{\text{ос}}}{F_{\text{зат}} \cdot P_{\text{к}}}, \text{ мм/мин}, \quad (3.18)$$

откуда h (мм), а, следовательно, и угол наклона ψ траектории резания-скалывания PDC будут определяться такими зависимостями:

$$h = V_0 \frac{P_{oc} \cdot 60}{n \cdot F_{зат} \cdot P_k}; \text{ (мм)} \quad (3.19)$$

$$\psi = \text{arc tg} \frac{60 \cdot V_0 \cdot P_{oc}}{n \cdot F_{зат} \cdot P_k \cdot 2\pi Ri}; \text{ (град)} \quad (3.20)$$

где n – частота вращения долота, об/мин;

60 – коэффициент перевода мм/с в мм/мин;

Ri – радиус установки PDC на долоте, мм.

Тогда, например, при бурении известняка средней крепости с $P_k = 650$ МПа, долотом $\varnothing 215$ мм, $d = 13,5$ мм, имеющим площадку затупления $F_{зат} = 56 \cdot 1,25 \text{ мм}^2 \cong 70 \text{ мм}^2$, с частотой вращения $n = 120$ об/мин, при осевой нагрузке $P_{oc} = 15 \cdot 10^4$ (Н) h будет равно:

$$h = \frac{60 \cdot 15 \cdot 10^4 (\text{Н}) \cdot 6,6 (\text{мм/с})}{120 (\text{об/мин}) \cdot 70 \text{ мм}^2 \cdot 650 \text{ Н/мм}^2} \cong 10,9 \text{ мм/об.}$$

Тогда для PDC, расположенных у самой оси долота, где $Ri \cong 14$ мм, угол наклона траектории резания ψ будет равен

$$\psi = \text{arc tg} \frac{h}{2\pi Ri} = \text{arc tg} \frac{10,9}{2\pi \cdot 14} \cong 7^\circ.$$

При этом задний угол α , значительно превышающий угол ψ в два-три раза должен быть в пределах $15 \div 20^\circ$.

На рис. 3.14 показано расположение режущих PDC на лопасти долота в продольной «а» и в диаметральной «б» плоскостях.

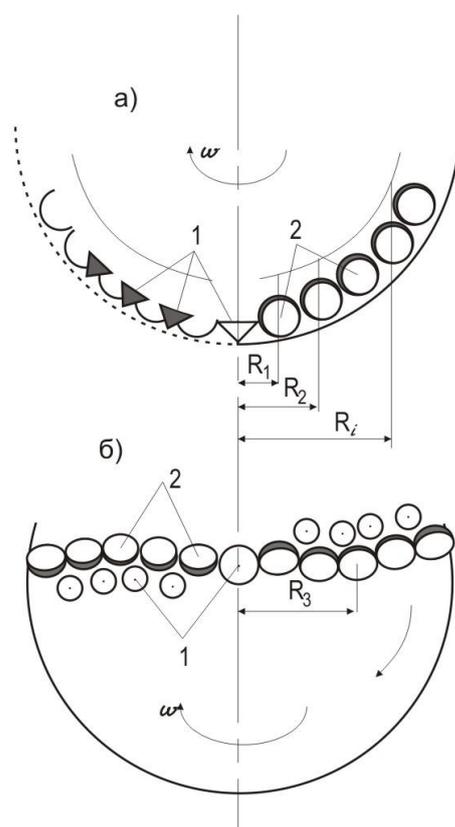


Рис. 3.14. Расположение PDC на наклонной лопасти долота:

а – в продольной плоскости; б – в диаметральной плоскости; 1 – PDC с выпуклой (конусной) передней поверхностью; 2 – PDC с плоской передней гранью

Рассмотренный пример показывает теоретическую возможность бурения новым острым долотом породы средней крепости при максимальной осевой нагрузке. При таких условиях механическая скорость бурения, определяемая по формуле

$$V_{\text{мб}} = n \cdot h, \text{ м/мин}$$

равнялась бы:

$$V_{\text{мб}} = 120 \frac{\text{об}}{\text{мин}} \cdot 10 \frac{\text{мм}}{\text{об}} = 1,2 \text{ м/мин.}$$

Представленные зависимости 3.21 и 3.22 показывают, как можно регулировать толщину срезаемого слоя породы h и угол наклона ψ траектории резания-скалывания, предупреждая возможность посадки PDC на заднюю грань.

Необходимость наклона PDC к плоскости резания для образования заднего угла α конструктивно определяет величину переднего угла β . А т.к. угол заострения γ равен 90° , то передний β и задний α равны по модулю, но с противоположными знаками, т.е.

$$|\alpha^\circ| = |-\beta^\circ|$$

Отрицательный передний угол увеличивает сопротивление породы разрушению. Однако некоторые исследователи [15, 76] допускают возможность его увеличения до -30° , -35° и даже до -40° .

Экспериментальные исследования показывают [23-24, 91, 94], что сопротивление породы дроблению R_d и скалыванию $R_{ск}$ (см. рис. 3.12) пропорциональны контактной прочности P_k ,

$$R_d = 0,24P_k$$

$$R_{ск} = 0,08P_k - \text{для резцов с отрицательным передним углом } \beta.$$

Тогда усилие резания-скалывания, определяемое по формуле (3.21) будет увеличиваться с ростом $R_{ск}$ и уменьшением угла скалывания τ

$$F_{рез} = \mu_c \cdot R_d \cdot F_{зат} + \frac{R_{ск} \cdot h \cdot R(\sin\delta + \mu_c \cdot \cos\delta)}{2\sin\tau \cdot \sin(\tau + \delta)}, \quad (3.21)$$

где $F_{зат}$ – площадка затупления, мм²;

h – толщина срезаемого слоя породы, мм;

R – радиус установки PDC, мм;

δ – угол заострения, град;

τ – угол скалывания, град;

μ_c – коэффициент трения PDC о породу, равен 0,35.

В этой формуле отсутствует в явном виде влияние переднего угла β на усилие резания $F_{рез}$. Оно зашифровано в сопротивление породы скалыванию $R_{ск}$ для резцов с отрицательным передним углом. Величина переднего угла буровых инструментов по данным разных исследователей колеблется в пределах от -10° до -40° . Однако при любом значении отрицательности переднего угла в породе происходит сдвиг со сжатием, увеличивающий предел прочности при сдвиге (скалывании) кратно. Так, например, в соответствии с теорией прочности Мора

(рис. 3.15) для породы средней крепости с $P_k = 650$ МПа, пределом прочности при сжатии $\sigma_{сж} = 77$ МПа и пределом прочности при растяжении $\sigma_p = 15$ МПа, угол внутреннего трения φ будет равен $\varphi = 42^\circ$.

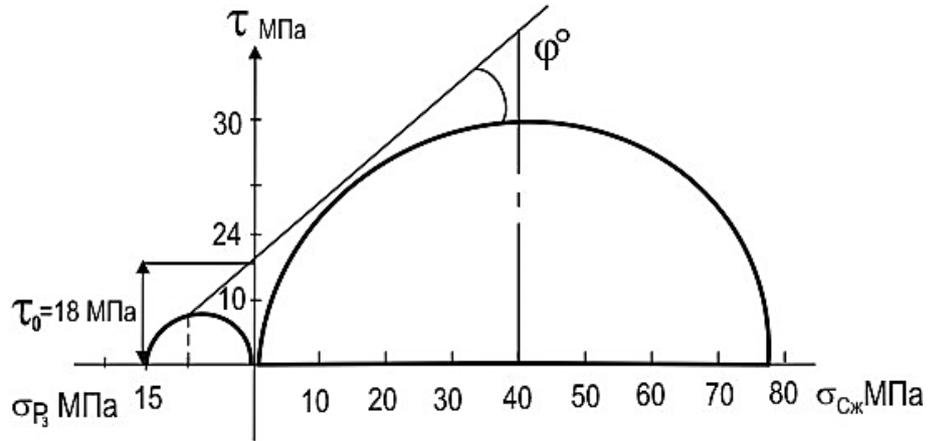


Рис. 3.15. Построение кругов Мора и определение коэффициента сцепления τ_0 и угла внутреннего трения φ для породы с $P_k = 650$ МПа

Предел прочности породы при сдвиге со сжатием определяется по формуле

$$\tau = \tau_0 + \sigma_{\Pi} \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

где σ_{Π} – составляющая предела прочности при сжатии в зависимости (зависящая) от переднего угла β .

На рис. 3.16 представлена схема к определению σ_n при резании-скалывании в зависимости от переднего угла β .

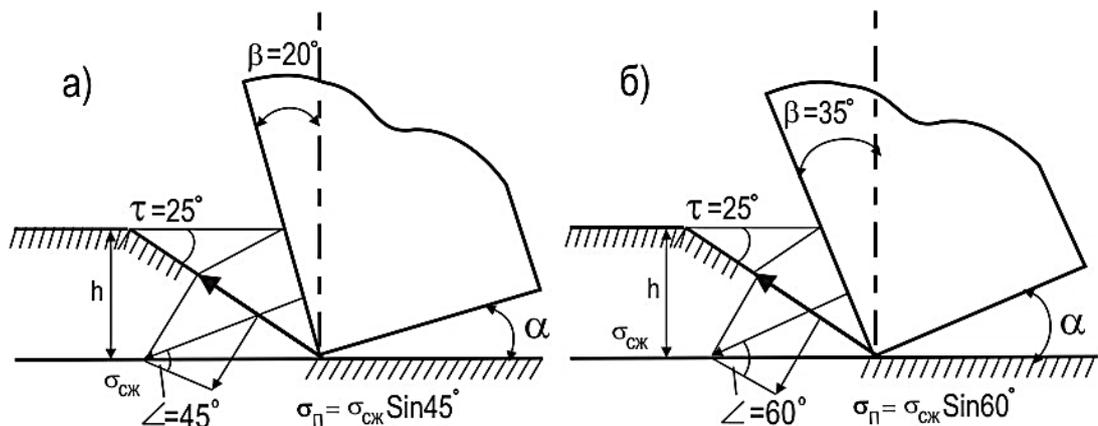


Рис. 3.16. Схема к определению σ_n при резании-скалывании в зависимости от переднего угла:

а – при $\beta = 20^\circ$; б – при $\beta = 35^\circ$

Тогда предел прочности при сдвиге со сжатием для породы с $P_k = 650$ МПа будет равен:

1. При $\beta = 20^\circ$; $\tau = 18 \text{ МПа} + 77 \cdot \sin 45^\circ \cdot \text{tg}42^\circ = 66,9 \text{ МПа}$;
2. При $\beta = 35^\circ$; $\tau = 18 \text{ МПа} + 77 \cdot \sin 60^\circ \cdot \text{tg}42^\circ = 78,3 \text{ МПа}$.

Принимаемое в расчетах $R_{ск} = 0,08 \cdot 650 = 52 \text{ МПа}$.

Зависимость результирующей силы резания от значений отрицательности переднего угла β PDC для различных пород представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Зависимость результирующей силы резания от значений отрицательности переднего угла β PDC для различных пород

Передний угол β , град	-10	-15	-20	-25	-30	-35
Результирующая сила резания в относительных единицах, %	100	102	107	114	124	141
Коэффициент вариации, в %	10÷12	15	18	23	28	25

Расчеты по формулам 3.21, 3.22 и 3.23 дают в подавляющем большинстве случаев коэффициенты вариации, равные 10÷25 %, считаемые в нефтегазовом бурении практически точными.

Из табл. 3.2 видно, что с увеличением отрицательности переднего угла β стабилизация процесса бурения уменьшается. Поэтому для калибрующих скважину режущих элементов, где необходима стабильность процесса резания, принимается передний угол β равный -10° .

У буровых долот режущие PDC расположены на всех линиях резания от оси до R_{max} . В соответствии с формулой 3.22 углы наклона винтовых траекторий, а, следовательно, передних β и задних α углов, наклоны PDC зависят от R_i радиуса их установки и они и все разные.

Некоторые исследователи идут по этому пути, предлагая для каждого радиуса установки свой передний β и задний α углы.

Альтернативой такому подходу являются теоретические зависимости (3.20, 3.21, 3.22), позволяющие по заданной механической скорости бурения и другим

режимным параметрам определять толщину h срезаемого слоя породы за один оборот долота и рассчитывать необходимый для этого угол β наклона PDC.

3.3. Разработка технологии крепления пластин PDC на корпус буровых долот

Технология пайки PDC на корпус буровых долот является технологическим моментом сборки долот. От качества пайки зависит трудоспособность долота и, как результат, механическая скорость бурения горных пород и проходка на долото.

Изготовление экспериментальных долот производилась в условиях механических мастерских ЮРГПУ(НПИ). Крепление пластин PDC на корпус долота при помощи индукционной пайки в индукторе или газопламенной пайкой, используя горелку.

Экспериментально в условиях механических мастерских были испытаны припои: ПСр-70, FH-12, ПСр-45, ПСр-40, ПСр-25, ПСрЦЛА-12-31-0,05, ПСрФол. Лучшим по всем показателям оказался припой ПСр-45, который и использовался для изготовления долот в дальнейшем. При выборе флюса, наиболее эффективным оказался флюс специальный – FH-12.

Выполненная серия опытных работ позволила установить, что лучшим вариантом закрепления пластин PDC на корпус долота является пайка на оборудовании с применением токов высокой частоты (ТВЧ). Оптимальной оказалась температура пайки 550–650°C, при такой температуре алмазный слой пластины PDC не отслаивается от вольфрамкобальтовой подложки ВК-20.

Перед пайкой PDC долота опускают на 20 минут в раствор медного купороса (CuSO_4), при этом идет естественное осаждение пленки меди в посадочном гнезде, что способствует в дальнейшем пайку производить более качественно, избегая получения оксидной пленки железа в месте посадки PDC.

Для выполнения лабораторных работ использовалось следующее оборудование центра коллективного пользования «Нанотехнологии» НИИ Нанотехнологий и новых материалов ЮРГПУ (НПИ) имени М.И.Платова: система измерения твердости по шкале Роквелла; сканирующий электронный

микроскоп QUANTA 200 (FEL, Голландия); микроскоп стереоскопический для микроструктурного анализа с цифровой камерой; анализатор фрагментов микроструктуры твердых тел «Siams 700»; оптико-эмиссионный спектрометр Q8MA GELLAN; дифрактометр ARLXTRA («Thermo Scientific, Швейцария»). Для выполнения рентгенофазового анализа; микроанализатор EDAX Genesis (приставка энергодисперсионного анализа к микроскопу QUANTA 200).

QUANTA 200 – совершенный многофункциональный сканирующий электронный микроскоп для автоматизированных исследований на современном уровне. Отличительная особенность микроскопа состоит в возможности исследования объектов в высоком и низком вакууме, а также в естественной среде, что позволяет изучать более широкий спектр объектов.

Техническая характеристика QUANTA 200: увеличение – 500–1500000 крат; разрешение – 3,5 нм при 30 кВ в режиме высокого вакуума; давление в камере – 10^{-3} Па; величина горизонтального поля зрения, макс. – 10 мм; ток зонда до 1 мкА; время откачки до высокого вакуума – 3,5 мин.

QUANTA 200, оснащенный приставкой энергодисперсионного анализа EDAX Genesis, обладает такими же информационными возможностями, как при использовании нескольких аналитических средств (три вакуумных режима, увеличение до 200000х, разрешение 3 нм, элементный анализ с построением карт распределения химических элементов по поверхностям. Техническая характеристика микроанализатора EDAX Genesis: разрушающая способность в точке – 1 мкм^3 ; время проведения анализа в точке – 1 мин; время набора элементной карты – от 15 до 60 мин; детектируемые элементы – от Be^4 до V^{92} ; элементный анализ – качественный и количественный; количественный анализ представлен в весовых и атомарных процентах; погрешность количественного анализа – 2,5 % для тяжелых элементов и до 10 % для легких элементов.

Используя возможности ЦКП «Нанотехнологии» было выполнено комплексное металлографическое исследование материалов долот, армированных пластинами PDC – химический и спектральный анализ, структурные исследования (макро-микроструктура), электронно-оптический и

рентгеноструктурный анализ, фактографический анализ, дефектообразование в корпусах буровых долот. Испытанию подвергались пластины PDC \varnothing 13,5 мм (h – 2,0 мм, H – 4,5 мм).

Кроме того, обследованию подвергались корпуса долот, фрагменты корпусов (сектора), паяный слой, твердосплавная подложка BK-20 и стыковочные швы между корпусом долота – паяным слоем, паяным слоем – твердосплавной подложки, твердосплавной подложкой – алмазным слоем. Тщательно исследовался слой алмазного порошка (монокристаллические синтетические алмазы). Твердость всех составляющих долота определялась на приборе ПМГ-3 с алмазным интентором по методу Роквелла (HRA). Все испытания выполнялись до и после выполнения пайки пластины PDC на корпус долота. Экспериментальные данные приведены на рис. 3.18–3.27.

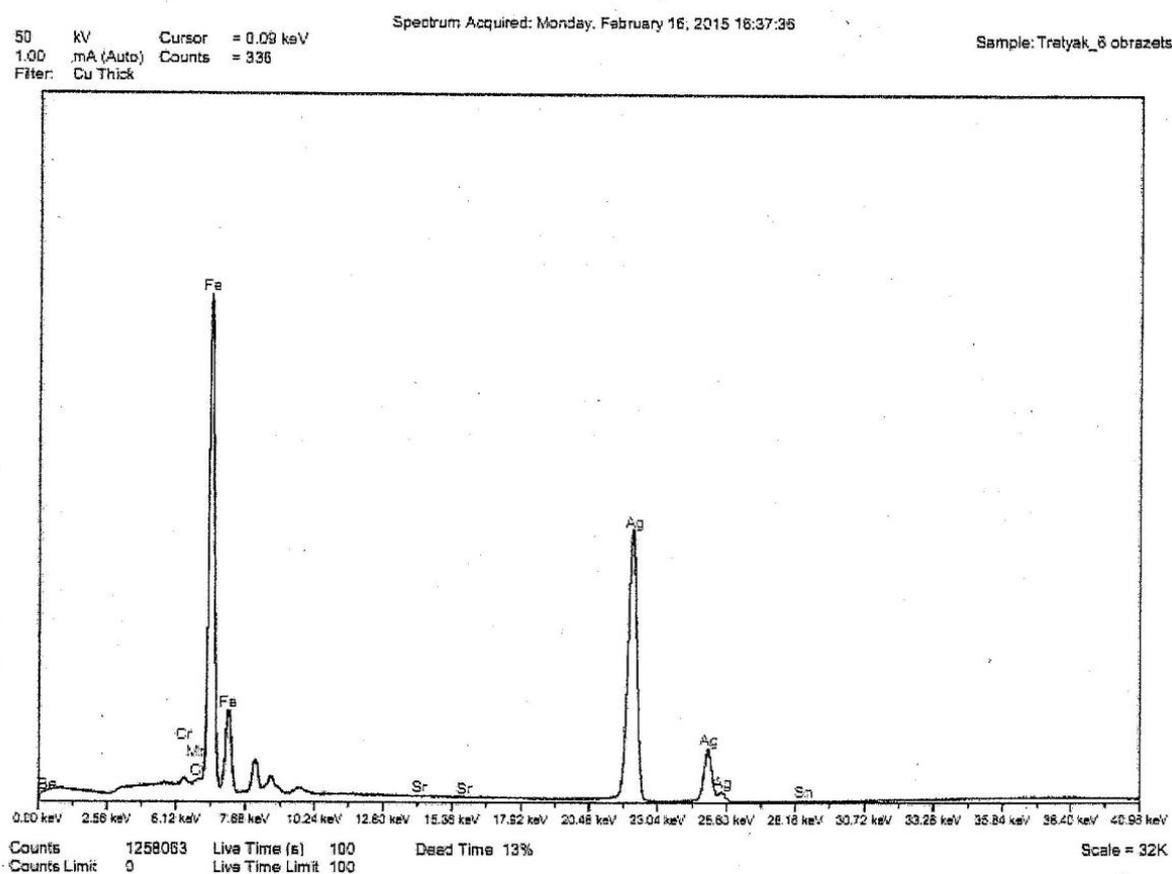


Рис. 3.18. Дифрактограмма образца № 1

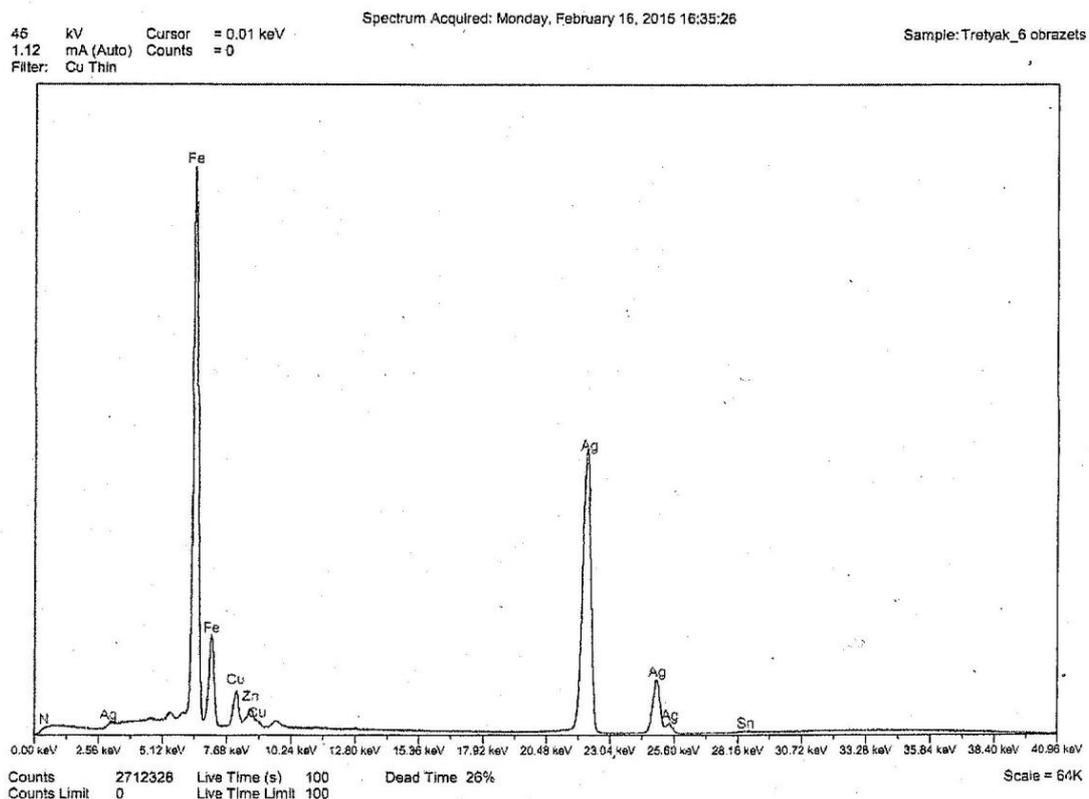


Рис. 3.19. Дифрактограмма образца № 2

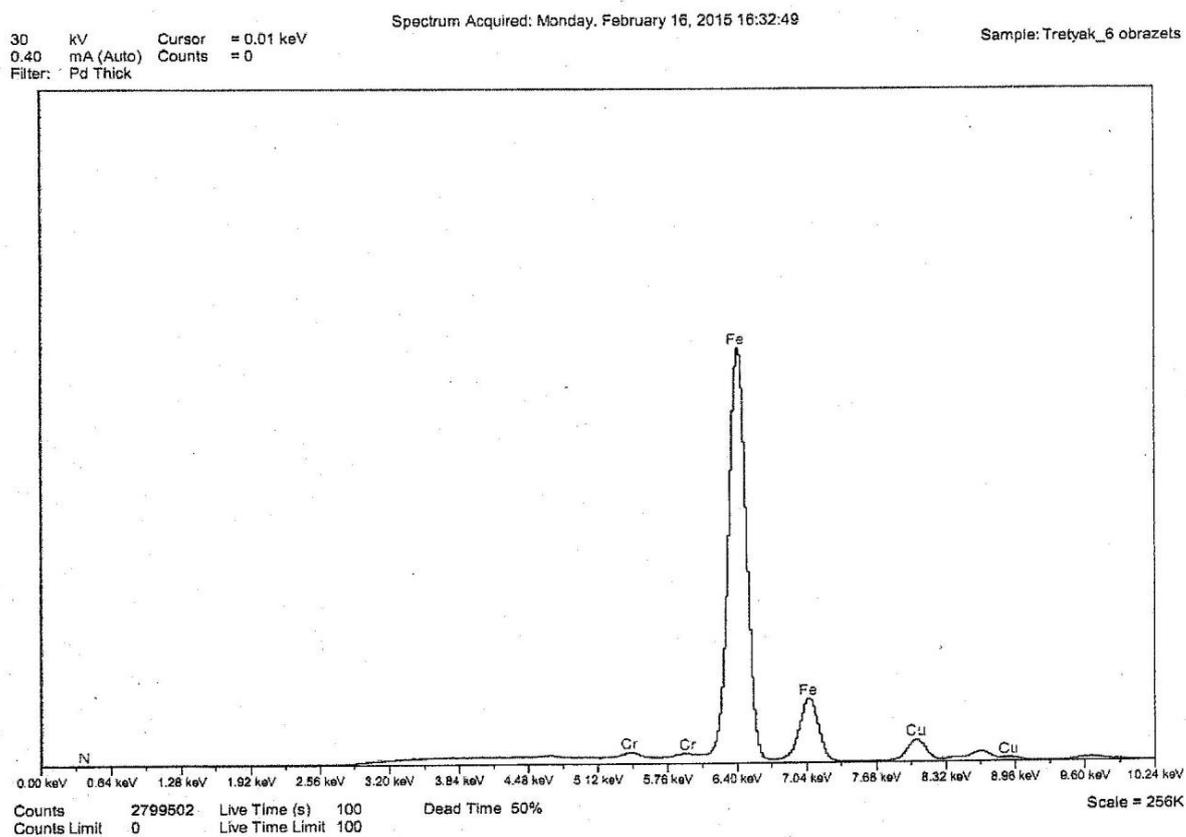


Рис. 3.20. Дифрактограмма образца № 3

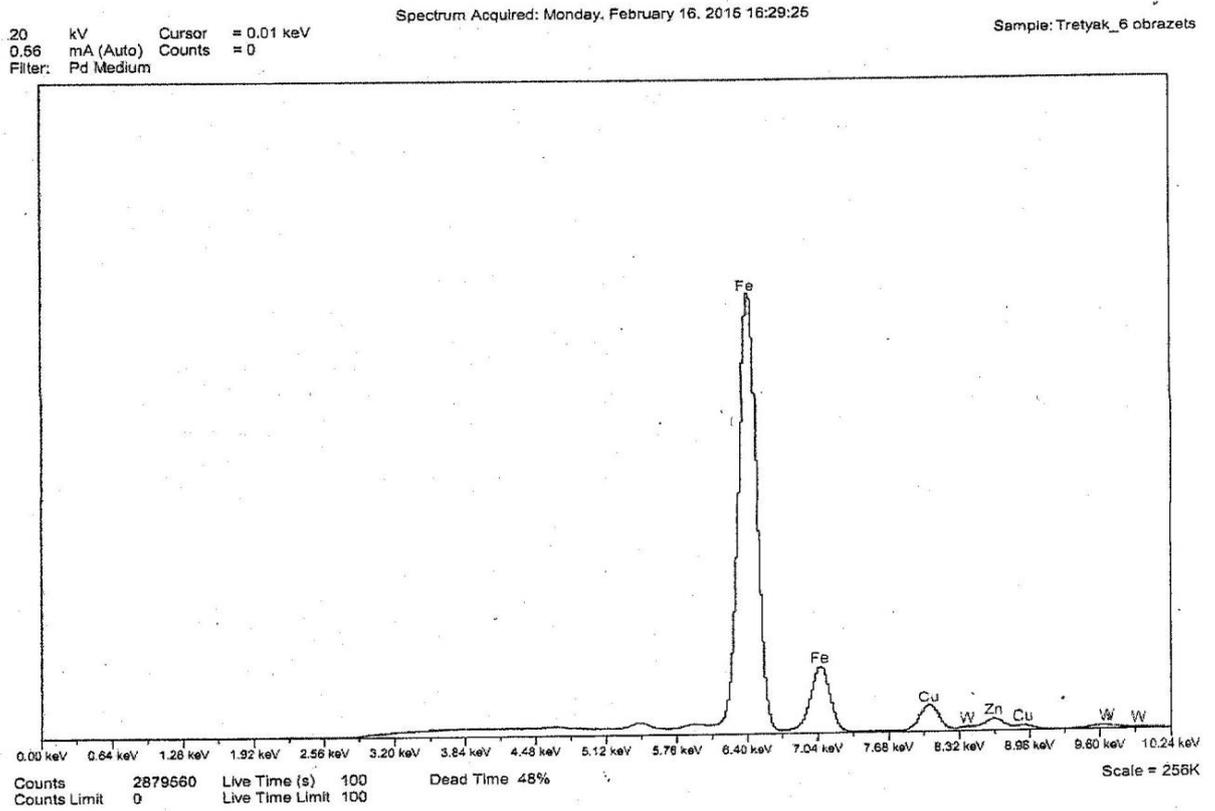


Рис. 3.21. Дифрактограмма образца № 4

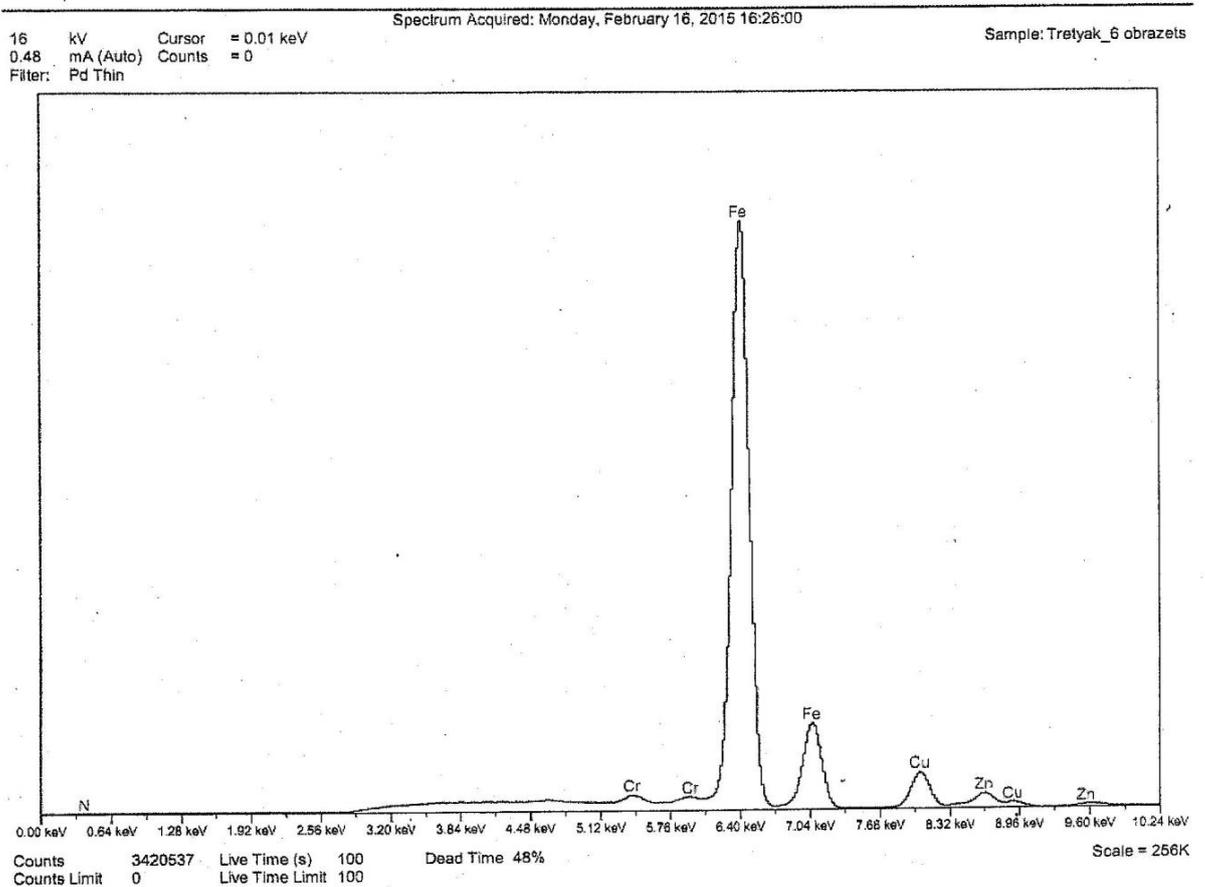


Рис. 3.22. Дифрактограмма образца № 5

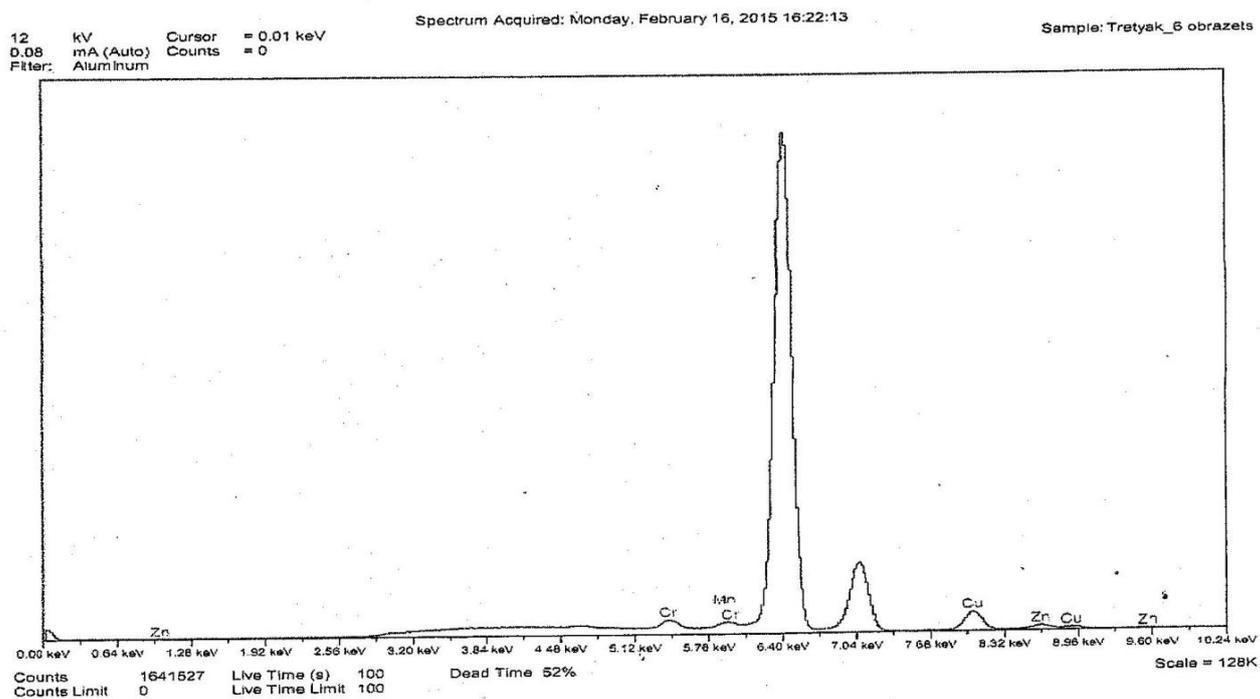


Рис. 3.23. Дифрактограмма образца № 6

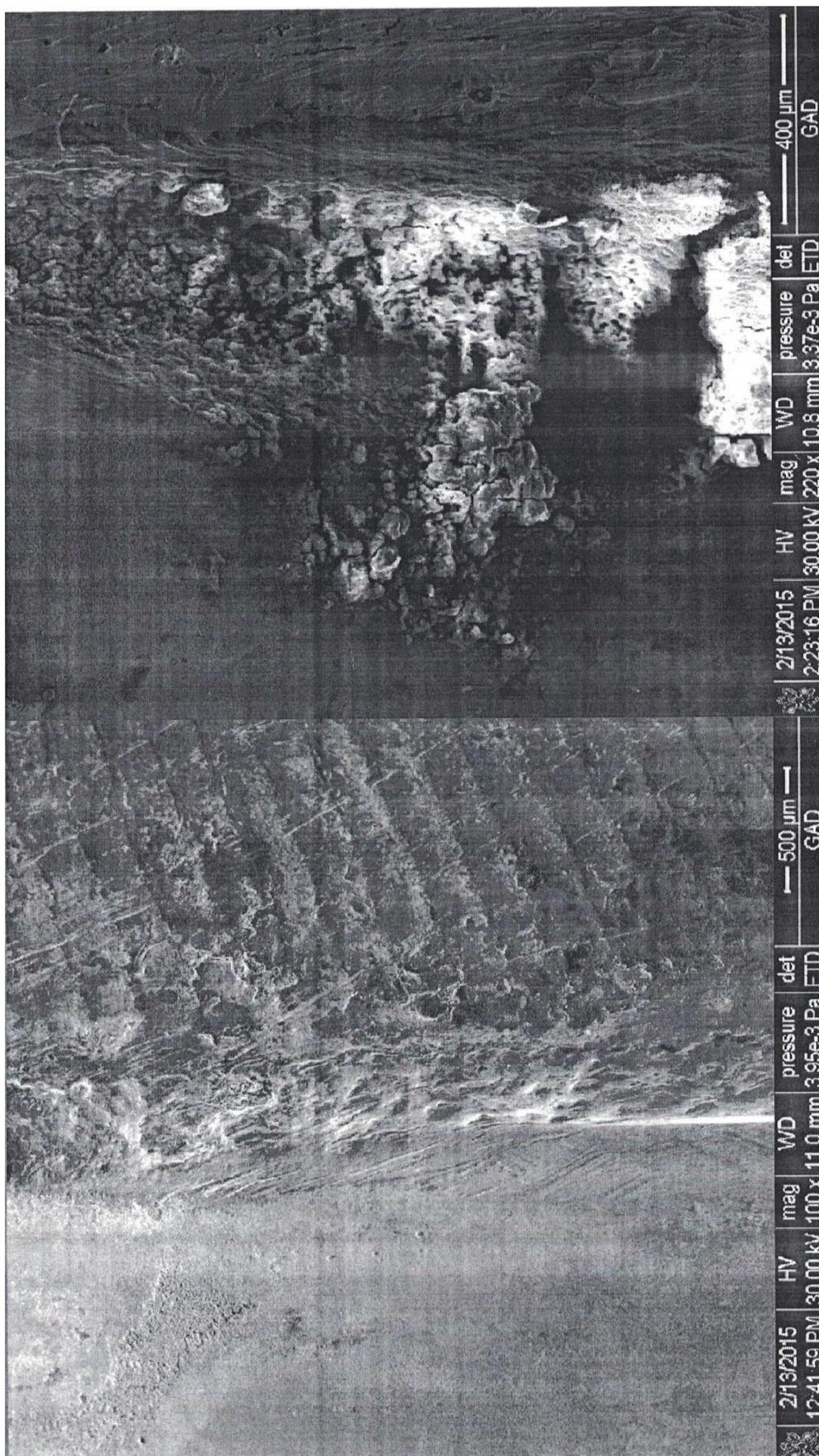


Рис. 3.24. Результат пайки пластины PDC на корпус долота

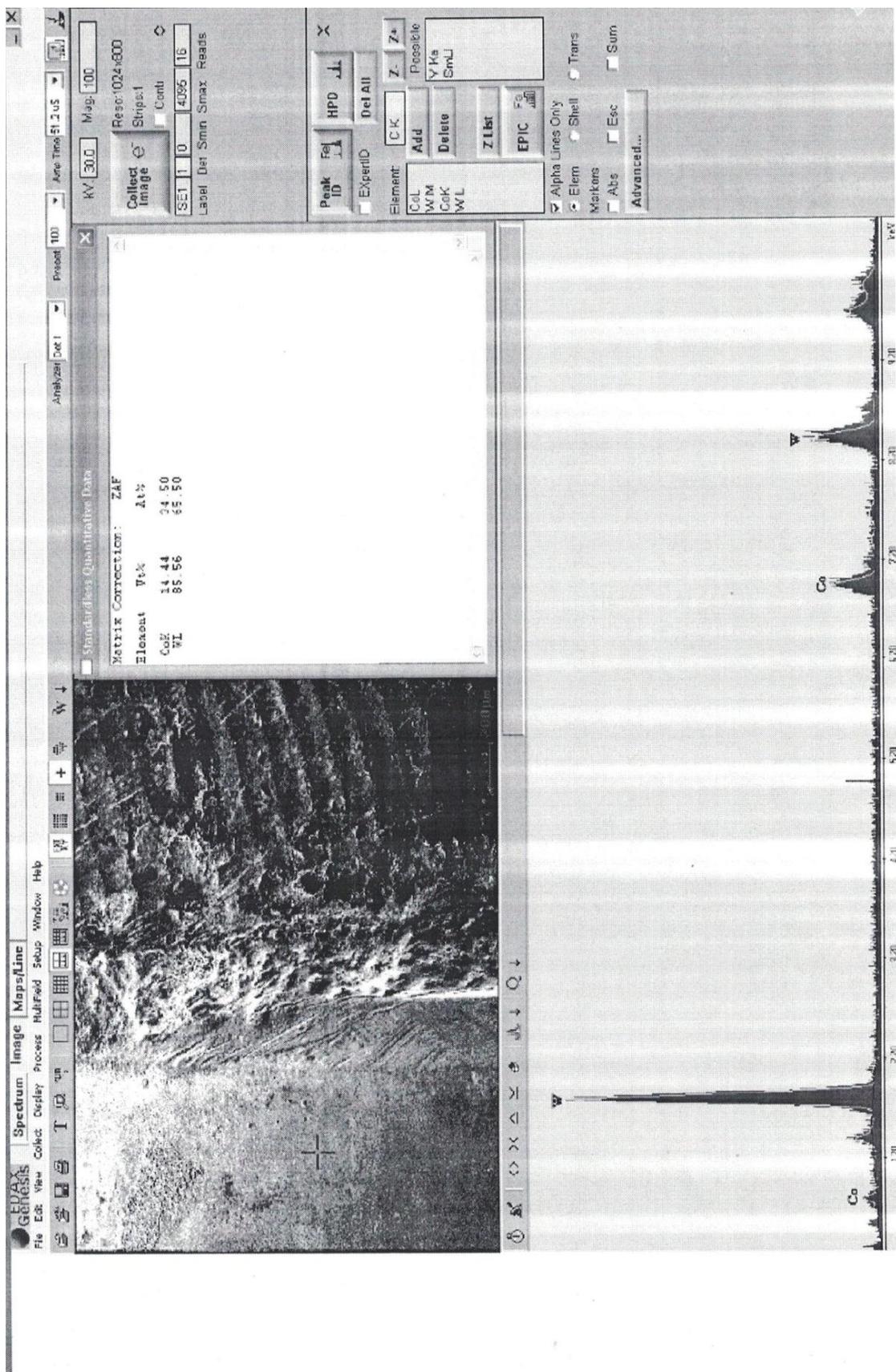


Рис. 3.25. Результат пайки пластины PDS на корпус долота

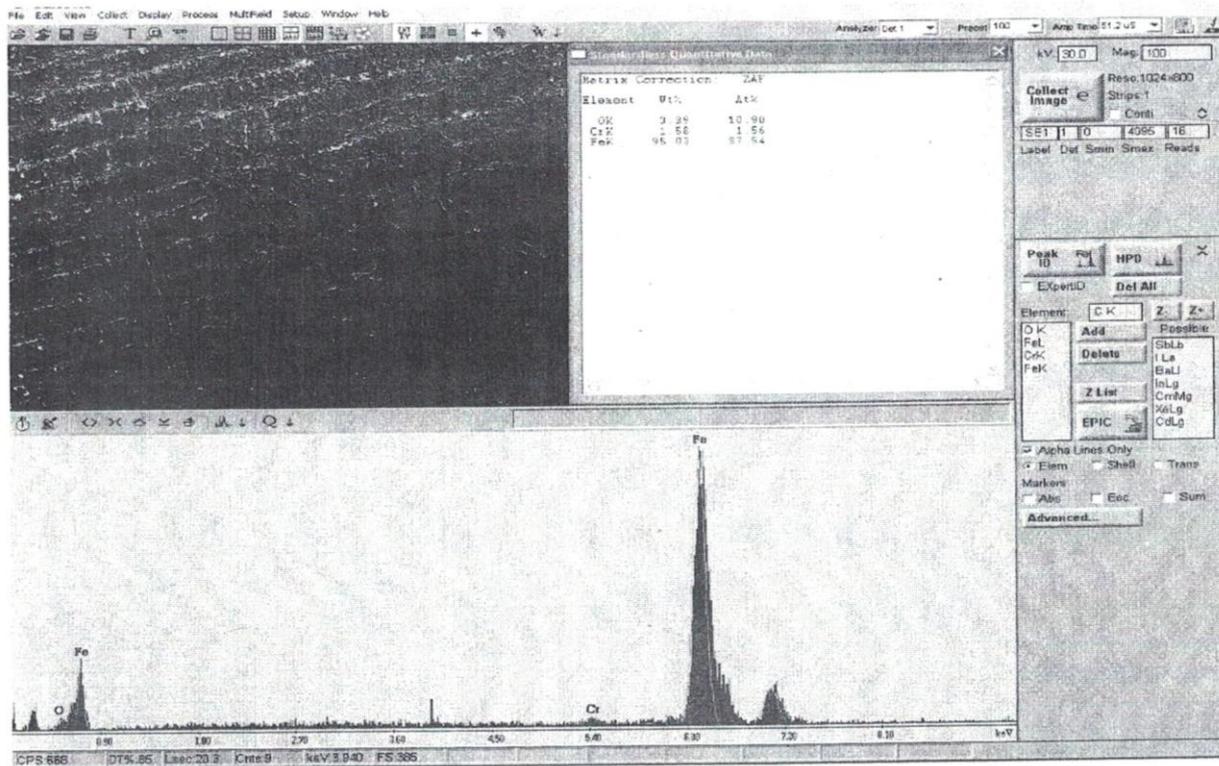


Рис. 3.26. Образец пластины PDC (участок вольфрамокобальтовой подложки)

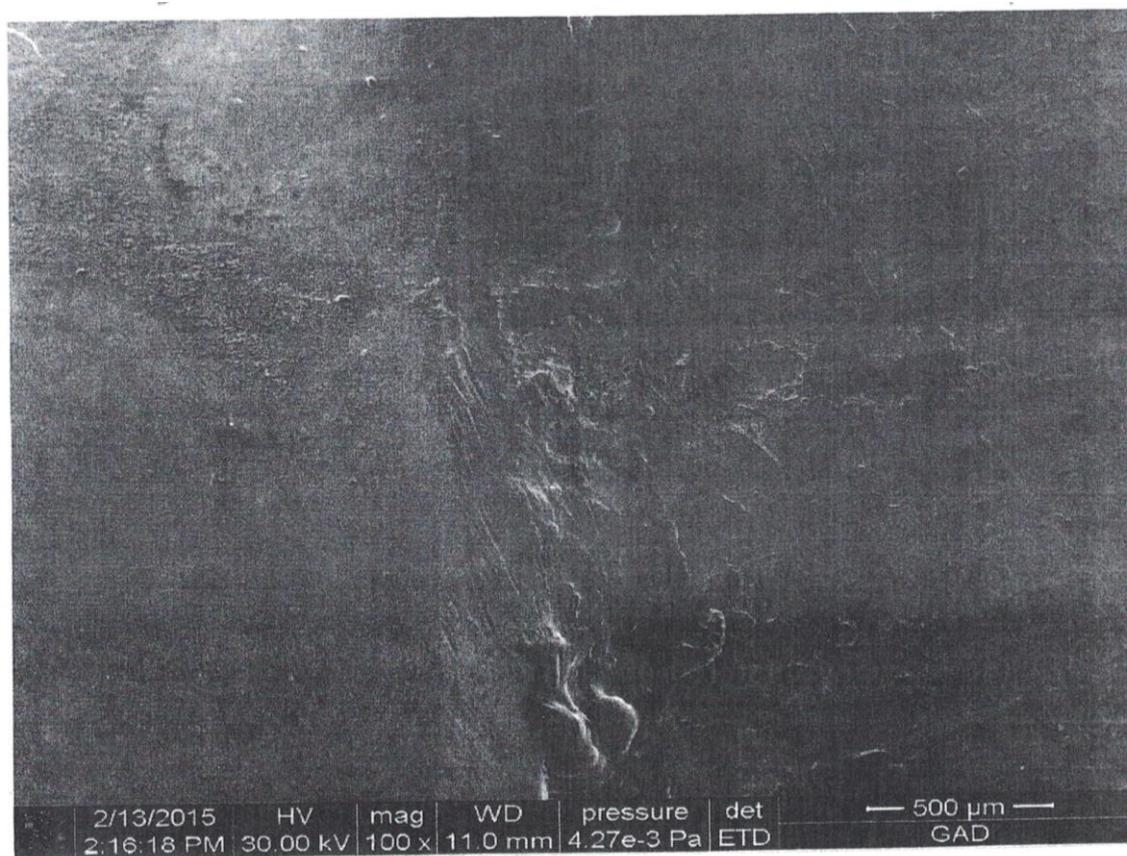


Рис. 3.27. Образец пайки пластины PDC на корпус долота

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

- разработанная технология пайки пластины PDC на корпус долота является оптимальной;
- состав припоя и состав флюса подобран технологически верно;
- высокое качество пайки пластины PDC подтверждается исследованиями, выполненными в центре коллективного пользования «Нанотехнологии» Южно-Российского государственного политехнического университета имени М.И. Платова;
- внедрение в практику буровых работ разработанных буровых долот диаметром 215,9 мм для условий работы ООО НПП «Ростовская буровая компания» позволило достичь проходки на долото 1100 метров, при средней механической скорости бурения по горным породам VI-VIII категории по буримости равной 29,5 м/час.

Глава 4. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТРАБОТКИ БУРОВЫХ ДОЛОТ, АРМИРОВАННЫХ ПЛАСТИНАМИ PDC

Расчет экономической эффективности применения новых конструкций породоразрушающего инструмента является очень сложным. Относительную же оценку эффективности применения долот можно получить, используя методику ВНИИБТ [56], которая учитывает проходку на долото и рейсовую скорость. Для расчета приняты долота, армированные PDC, диаметром 215,9 мм (данные таблицы 4.1), которые обрабатывались в ООО НПП «Ростовская буровая компания». Отработка выполнялась при одинаковых геолого-технических и режимных параметрах, соответствующим технологическому регламенту.

В таблице 4.1 приведены основные сравнительные данные на отработке долота \varnothing 215,9 мм, армированного пластинами PDC.

При сравнении экономической эффективности долот \varnothing 215,9 мм, армированных PDC с отечественными шарошечными долотами III 215,9 СГВ использовались следующие показатели: количество долот, время механического бурения, время затрачиваемое на спускоподъемные операции и ПЗР.

Результаты расчета экономической эффективности для долота \varnothing 215,9 мм, армированного PDC, показывают, что при применении данного долота в интервале 2200-2600 метров денежные затраты сокращаются на 112787 рублей.

Себестоимость 2-х ярусного долота \varnothing 215,9 мм со съемными режущими элементами составляет 300 тыс. рублей.

Себестоимость долота \varnothing 215,9 мм трехшарошечного составляет порядка 200 тыс. рублей. Но применять долото \varnothing 215,9 мм, армированного PDC, экономически выгодно, так как проходка на это долото в 8 раз больше, а замена резцов PDC позволяет экономить на самом корпусе долота и использовать его несколько раз.

Таблица 4.1. Экономическая эффективность применения долот

Наименование показателей	Единицы измерения	111215,9 СГВ R-192	215,9 PDC
Исходные данные			
Средняя глубина скважины	м	2600	2600
Интервал бурения	м	2200 2600	2200 2600
Проходка на долото	м	78,2	629
Механическая скорость	м/ч	8,9	8,2
Время на рейс СПО	ч	5,8	5,8
Время ПЗР на 1 рейс	ч	0,83	0,83
Тип забойного двигателя		ЗТСШ1-195	Д1-172
Расчетные показатели			
Проходка в интервале	м	650	650
Количество долот	шт.	8,3	* 1,03
Время механического бурения	ч	73,0	79,3
Время СПО	ч	48,2	19,2
Время ПЗР	ч	6,9	2,7
Итого времени	ч	128,1	101,2
Эксплуатационные затраты			
а) стоимость долот	руб.	318724	450624
1	2	3	4
Расчет экономического эффекта			
Стоимость 1 часа работы буровой установки по затратам, зависящим от времени	руб.	9210	9210
б) механическое бурение	руб.	672640	730061
в) СПО	руб.	444012	176431
г) ПЗР	руб.	63540	25248
Итого	руб.	1498916	1382364
Экономия эксплуатационных затрат на 1 долото типа PDC	руб.	116552	
Экономия себестоимости 1 м проходки в интервале 2500-2900 м на 1 долото	руб.	179,3	
Экономия затрат на одно долото Ø 215,9 PDC	руб.	112787	

Таким образом экономия затрат при отработке одного долота Ø 215,9 мм, армированного PDC, составляет 112,7 тысяч рублей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Выполненные экспериментальные и теоретические исследования по теме диссертации позволили сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Обобщён опыт и систематизированы результаты исследований по конструкции буровых долот, армированных пластинами PDC, позволившие сформировать основные цели и задачи исследования.

2. На основании выполненных экспериментов по ускоренному изнашиванию режущих элементов буровых долот, получены зависимости определения интенсивности изнашивания пластин PDC по высоте при бурении пород средней и выше средней крепости.

3. Установлена закономерность, позволившая разработать нейросетевую модель, позволяющую прогнозировать интенсивность аномального изнашивания резцов PDC буровых долот, которую целесообразно применять при разработке технологии бурения с целью повышения эффективности буровых работ и повышения качества отработки буровых долот.

4. Геометрическая оптимизация углов установки PDC-резца выполнена в программной среде «SolidWorks».

5. Предложена модель прогнозирования степени износа PDC-резца на основе регрессионных моделей, полученных имитационно-экспериментальным методом с использованием программной среды Abaqus Explicit.

6. Разработан конструктивный ряд двухъярусных антивибрационных буровых долот, армированных пластинами PDC, применение которых способствует значительному уменьшению степени вибрации.

7. Выполненные исследования внедрены в практику буровых работ ООО НПП «Ростовская буровая компания».

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. A. Tretyak, V. I. Balaba, V. V. Popov, N. E. Fomenko, K. A. Borisov, V.A. Tkachev / New generation drilling bits [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2017. - Vol. 87: Mining and exploration of mineral resources. - Режим доступа : <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/5/052029/pdf>.
2. A. A. Tretyak, K. A. Borisov, A.N.Grossu / The Use of New Wear-Resistant Materials in the Development of Two-Level Bits with a Balanced Resultant Moment at the Drilling Flight // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. - Vol. 272 (2): International science and technology conference "Earth science" 4–6 March 2019, Russky Island, Russian Federation. - № 022213. - Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/272/2/022213/pdf>.
3. Beilin F., Dourfaye A., King W., 2010. «The Current State of PDC Bit Technology»: Part 3. / World Oil. (November 2010): Pp. 67–71.
4. Syzrantseva, K., Arishin, V., Dvoynikov, M. Optimization of the damping element of axial vibrations of the drilling string by computer simulation // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – № 11 (10), pp. 2312–2315.
5. Tretyak, A. A., Borisov, K.A. / Method of calculating the wear and PDC bit operating time // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019 : Proceedings of the XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers under the auspices of UNESCO (St. Petersburg Mining University, Russia, 13-17 May 2019). – London : CRC Press, 2020. – Vol. 2. – P. 791-795
6. Tretyak, A.Y., Borisov, K.A., Getmanchenko, S.A. / Hydrodynamic analysis of the PDC drill bits // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019 : Proceedings of the XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers under the auspices of UNESCO (St. Petersburg Mining University, Russia, 13-17 May 2019). – London : CRC Press, 2020. – Vol. 2. – P. 935-939.
7. W.S.Sarle. Neural Networks and Statistical Models // Proceedings of the Nineteenth Annual SAS Users Group International Conference, Cary, NC, SAS Institute, April 3-4, 1994, 1538–1550.

8. А.А. Третьяк, Ю.Ф. Литкевич, К.А. Борисов. Лабораторные исследования поломок режущих элементов буровых долот, армированных алмазно-твердосплавными пластинами // Деловой журнал Neftegaz.ru. – 2018. – № 7. – С. 50-54.
9. Антивибрационная кольцевая буровая коронка // Патент № 2613712 Рос. Федерации / Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Борисов К.А. Заявл. 29.03.16, опубл. 2.03.17, Бюл. № 9.
10. Аракчеев С.Н. Анализ изменения стойкости от ширины притупления режущей кромки твердого сплава буровой коронки. - М.: МГГУ// Горный информационно-аналитический бюллетень, – 2006, – № 10. – С. 318.
11. Арцимович В.Г., Лукаш В.А. / «Об износе твердых сплавов при бурении горных пород» // «Горный породоразрушающий инструмент». – Киев: Техника, 1969. – С. 35–42.
12. Ахметшин Д.М. «Повышение эффективности работы долот режуще-скалывающего действия путем оснащения комбинированным по форме вооружением: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.15.10 / Д.М. Ахметшин. – Уфа, 1994. – 25 с.
13. Башкатов Д.Н. Вопросы выбора критерия оптимизации процесса бурения. НТЖ. Инженер-нефтяник 1, 2009. – С. 17–19.
14. Башкатов Д.Н. Коломиец А.М. Оптимизация процессов разведочного бурения. М. 1997, С. 259.
15. Башкатов Д.Н. Обоснование угла установки резцов в долотах лопастного типа. НТЖ Инженер-нефтяник, 2010, № 3, С. 21–24.
16. Богданов Р.К., Загора А.П., Исонкин А.М. и др. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном инструменте. - Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. –138 с.
17. Борисов К.А., Третьяк А.А. / Методика расчета износа и наработки на долото, армированное PDC / Бурение скважин в осложнённых условиях: III Междунар. науч.-практ. конференция 8–9 ноября 2018 г.: Тезисы докладов / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2018. – С. 29–30.

18. Борисов К.А., Третьяк А.А., Сидорова Е.В. / Влияние вибраций на прочностные свойства буровых долот, армированных PDC // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 12. – С. 33-37.
19. Борисов К.И. Динамика работы резцов в процессе разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия типа PDC/ Известия Томского политехнического университета. 2010, т.317, №1.– С. 161–164.
20. Борисов К.И. Методика оценки динамических прочностных свойств горных пород и эффективности процесса разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия.- Бурение и нефть.– 2008.– № 1. – С. 24–27.
21. Борисов К.И. Методика оценки эффективности процесса динамического резания горных пород инструментами режуще-скалывающего действия. – Нефтяное хозяйство. – №8.- 2008. – С. 112–113.
22. Борисов К.И. Научная база нового метода оценки эффективности процессов разрушения горных пород современными инструментами режущескалывающего действия// Вестник ЦКР Роснедра. – 2011. – № 4. – С. 51–58.
23. Борисов К.И. Прикладные аспекты нового научного метода оценки свойств и эффективности процесса разрушения горных пород. Бурение и нефть.- 2010.- №3. С. 24–27.
24. Борисов К.И. Разработка научного метода объективной оценки процессов динамического разрушения горных пород инструментами режущескалывающего действия класса PDC (часть I)// Инженер-нефтяник.- 2010.- № 4. - С. 23–26.
25. Борисов К.И. Экспериментальная количественная оценка силовых характеристик резания горных пород// Известия ВУЗов ТПУ, Т. 305. – Вып.8.- 22.- С. 216–219.
26. Будюков Ю.Е. Алмазное бурение направленных и многоствольных скважин. / Ю.Е. Будюков, В.И. Спирин.- Тула: ИПП «Гриф и К0», 2007. – 180 с, ил.

27. Будюков Ю.Е. Алмазный породоразрушающий инструмент. Ю.Е. Будюков, В.И. Власюк, В.И. Спириин. – Тула: ИПП «Гриф и К0», 2005. – 288 с, ил.

28. Будюков Ю.Е. Разработка научных основ проектирования специального алмазного породоразрушающего инструмента и технологии его применения/ Диссерт. уч. ст. докт. техн. наук. – М.: МГГУ, 2003.

29. Буренков Н.Н. Вероятностный метод расчета износостойкости инструментов горных машин при резании пород. Горный информационно-аналитический бюллетень, №2, 2004 г., С. 254–256.

30. В. Канянта, А.Дормер, Н. Мерфи, А. Иванкович «Ударное усталостное разрушение поликристаллических алмазных компактных (PDC) резцов и влияние микроструктуры» // Международный журнал тугоплавких металлов и твердых материалов, вып. 46. – 2014. – С. 145–151.

31. В. Канянта, С. Озбайрактар, К. Мавея «Влияние параметров изготовления на напряженное состояние резца из поликристаллического алмаза» // Международный журнал тугоплавких металлов и твердых материалов, вып. 45, 2014. – С. 147–152.

32. Валюнин Д.А., Бугаев К.А., Волков Д.А., Ахмадуллин М.Э., Михайлов В. А., Ребриков А. А. Инновационные резцы Stabilis и долота Talon Force позволяют достичь новых рекордов при бурении карбонатов Самарской области: М., «Бурение и нефть», № 2, 2016. – С. 56–57.

33. Власюк В.И. Новые технологии в создании и использовании алмазного породоразрушающего инструмента/ В.И. Власюк, Ю.Е. Будюков, Л.К. Горшков, И. Осецкий, С.Я. Рябчиков, В.И. Спириин.- М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2002. – 140 с., ил.

34. Власюк В.И. Технические средства и технологии для повышения качества бурения / В.И. Власюк, Ю.Е. Будюков, В.И. Спириин. Тула: ИПП «Гриф и К», 2013, 176 с., ил.

35. Вопияков В.А., Посташ С.А., Колесников П.И. / Возникновение автоколебаний бурильной колонны – критерии износа шарошечных долот. / Бурение. 1974, №8. – С.23–25.

36. Горшков Л.К., Осецкий А.И. Исследования влияния конструктивных параметров коронки на механическую скорость бурения и интенсивность ее износа/ методика и техника разведки, 1999, № 9-10 (147148)

37. Гроссу А.Н., Борисов К.А. / Лопастное долото // Материалы Международной научно-практической конференции. «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ)» Москва, 04-06 апреля 2018 г.

38. Дверий В.П. / Стендовые исследования разрушения горных пород различными типами лопастных долот. // Вопросы глубокого бурения на нефть и газ. Москва: ВИЭМС, 1968. Вып.1. – С. 24–26.

39. Денисов П.А. Аналитическое решение дифференциального уравнения упрощенной модели Длилса-Аттерсона/ П.А. Денисов, Н.Ю. Лукьянова, А.Л. Арбамян // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Современные концепции развития науки» (Казань, 20.08.2016 г.) - Уфа: Аэтерна. – 2016. – Т.1. – С. 21–23.

40. Денисов П.А. О проблеме неустойчивости численно-аналитического решения дифференциального управления упрощенной модели Джилса Аттертона / П.А. Денисов, Н.Ю. Лукьянова, А.Л. Абрамян //Международное научное периодическое издание “Новая наука: теоретический и практический взгляд” по итогам международной научно-практической конференции (Ижевск, 04.09.2016 г.). – Стерлитамак: АМИ.2016. – С. 105–107.

41. Долота PDC. Каталог нефтегазовой продукции, 2013-3014 г. Varel.

42. Дороднов И.П. Формирование ствола скважины в процессе бурения. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2002. – 279 с.

43. Патент РФ № 2 695 726. Стабилизирующее двухъярусное долото режуще-скалывающего типа. Борисов К.А. заявл. 13.04.2018 ; опубл. 25.07.2019, Бюл. № 21.

44. Ивченко, Г.И. Математическая статистика / Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев. // М.: КД Либроком, 2014. – 352 с.

45. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / Третьяк А.Я., Попов В.В., Гроссу А.Н., Борисов К.А. // ГИАБ. – 2017. – №8. – С. 225–230.

46. Калинин А.Г. Технология бурения разведочных скважин. / А.Г. Калинин, В.И. Власюк, О.В. Ошкордин, Р.М. Скрыбин.- М: Изд-во «Техника», ТУМАГРУПП, 2004. – 528 с.

47. Калинин А.Г., Ошкордин О.В., Питерский В.М., Соловьев Н.В. Разведочное бурение. – М.: Недра, 2000.

48. Конесев Г.В., Мавлютов М.Р., Спивак А.И. и др. Смазочное действие сред в буровой технологии М.: «Недра», 1993. – 271 с.

49. Крапивин М.Г., Раков И.Я., Сысоев Н.И. / «Горные инструменты», 3-е издание, переработанное и дополненное // Москва: «Недра», 1990. – 256 с.

50. Кубасов В.В. Исследование износа алмазных коронок. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2015. – № 4 (специальный выпуск 12). – 12 с. – М.: Изд-во «Горная книга», С. 6–11.

51. Кубасов В.В. Зависимость работоспособности алмазного породоразрушающего инструмента от смачиваемости алмаза металлом. / В.В. Кубасов, Ю.Е. Будюков, В.И. Спирин. Инновационные наукоемкие технологии: тезисы докладов междунар. научн.-техн. конф.; под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2014 г. – С. 6–11.

52. Куликов В.В. Научные основы промывки разведочных скважин в сложных геологических условиях: Автореф. дисс. докт. техн. наук / Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе. М.:2008. – 45 с.

53. Куликов В.В. Рациональная конструкция промывочной системы буровых коронок при бурении эжекторными снарядами в сложных геологических условиях. //Горный информационно-аналитический бюл. Деп. Изд-ва МГГУ. Спр. № 656/11-08 от 04.08.2008. – 6 с.

54. Литкевич Ю.Ф., Асеева А.Е., Третьяк А.А. Разработка методики расчета наработки породоразрушающего инструмента с алмазно-

твердосплавным вооружением. / Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2010. – №12. – С. 2–5.

55. Литкевич Ю.Ф., Мирный С.Г. Исследование контактной температуры на режущих кромках и определение максимальной частоты вращения резцов, армированных АТП/ Механизация и автоматизация горных работ: Сб. науч. тр./ Юж.-Рос. гос. техн. ун-т.- Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 1999. – С. 48-51.

56. Методика определения экономической эффективности внедрения новой буровой техники. - М.: ВНИИБТ, 1993. – 319 с.

57. Нескоромных В.В. «Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ». – Красноярск, СФУ, 2012. – 300 с.

58. Нескоромных В.В. Оптимизация при геологоразведочном производстве. М. Инфа - М, 2015. – 199с.

59. Нескоромных В.В., Борисов К.И. Аналитическое исследование процесса резания-скалывания горной породы долотом с резцами PDC / Известия Томского политехнического университета.2013, Т323, № 1 с.191-195.

60. Нескоромных В.В., Петенев П.Г., Неверов А.Л., Пушмин П.С., Романов Г.Р. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных горных пород / Известия томского политехнического университета, 2015, т326, №4, С. 30-39.

61. Нескоромных В.В., Пушмин П.С. Методика анализа ситуаций на забое скважины по углубке за один оборот алмазного породоразрушающего инструмента. Известия Сибирского отделения секций наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2012. – Т.40. – №1 С. 96 - 104

62. Нескоромных В.В., Пушмин П.С. Методика оптимальных параметров режима и условий бурения скважин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН – 2011. – №1 (38). – С. 151-157.

63. Оловянный А.Г. «Механика горных пород. Моделирование разрушений». – СПб: ООО «Издательско-полиграфическая компания «Коста», 2012. – 280 с.

64. Осецкий А.И. Новые направления в создании алмазного инструмента. Сб. ВИТР, вып. 6./ А.И. Осецкий, Н.И. Корнилов, В.А. Каулин. - СПб.: 1995.

65. Официальный сайт компании Волгабурмаш. Продукция для нефтегазовой промышленности. <https://vbm.ru/>

66. Официальный сайт компании Шлюмберже. ONYX 360 Rolling PDC Cutter. www.slb.com.

67. Пригорская Т.А. «Статистический анализ отработки долот типа PDC и прогнозирование их стойкости / Т.А. Пригорская // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 41–56.

68. Сергейчев К.Ф. Алмазные CVD-покрытия режущих инструментов (обзор)/ Успехи прикладной физики / С. 342–376, Т. 3, № 4, 2015.

69. Симонов В.В., Юнин Е.К. Влияние колебательных процессов на работу бурильного инструмента – М.: «Недра», 1977.-216с.

70. Соловьев Н.В. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях / Н.В. Соловьев, В.Ф. Чихоткин, Р.К. Богданов. А.П. Загора. - М.: ВНИИОЭНГ, 1997.– 330 с, ил.

71. Соловьев Н.В., Башкатов Д.Н., Горшков Л.К., Третьяк А.Я., Власюк В.И., Богданов Р.К., Загора А.П., Будюков Ю.Е., Спиринов В.И., Осецкий А.И., Исонкин А.М. Геологоразведочный породоразрушающий инструмент на основе алмазов и сверхтвердых материалов. Новочеркасск, ЮРГТУ(НПИ), 2009. – 333 с.

72. Соловьев Н.В., Исонкин А.М., Богданов Р.К., Шестаков С.И. Механизм разрушения горной породы и определение составляющих сил её резания буровым инструментом, оснащенным алмазно-твердосплавными пластинами. / Инженер-нефтяник №1, 2010, С. 32–36.

73. Спирин В.И. Особенности технологии бурения глубоких разведочных скважин в Норильском рудном районе./ В.И. Спирин, Ю.Е. Будюков, В.В. Кубасов. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент- техника и технология его изготовления и применения: Сборник Научных трудов – Вып. 17- Киев: ИСМ, НАН Украины, 2014, 32-36.

74. Спирин В.И. Способ изготовления алмазного породоразрушающего инструмента. / В.И. Спирин, В.И. Власюк, Д.М. Левин, Ю.Е. Будюков и др. Патент РФ на изобретение № 2202440. Бюл. изобр., 2003, №11.

75. Спирин В.И., Левин Д.М. Новые направления создания алмазного породоразрушающего инструмента. Тула. 2000.

76. Сысоев Н.И., Буренков Н.Н., Чу Ким Хунг. Обоснование структуры и выбор рациональных конструктивных параметров бурового резца, армированного алмазно-твердосплавными пластинами // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2016. № 2 (190). С. 77-83.

77. Третьяк А.А. Литкевич Ю.Ф., Борисов К.А., Гроссу А.Н. / Буровые коронки нового поколения / Нефть и газ - 2015: сборник тезисов 69-й Международной молодежной научной конференции, г. Москва., 14–16 апр. 2015 г. / РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина - Москва., 2015. - Т. 1. – С. 293.

78. Третьяк А.А., Балаба В.И., Попов В.В., Фоменко Н.Е., Борисов К.А., Ткачёв В.А. / Повышение надёжности буровых коронок, оснащенных алмазно-твердосплавными пластинами / Управление качеством в нефтегазовом комплексе. № 3-4, 2017. – С. 58–61.

79. Третьяк А.А., Борисов К.А. / Способ упрочнения буровых коронок, армированных алмазно-твердосплавными пластинами / Материалы II Всероссийский научно-практической конференции. Инновация в современной геологической науке и практике. Старый Оскол. 21-27 апреля 2016г. С 201-203.

80. Третьяк А.А., Борисов К.А. / Стабилизирующее двухъярусное долото режуще-скалывающего типа / Материалы Международной научно-практической конференции. «Стратегия развития геологического исследования

недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ)» Москва, 04-06 апреля 2018 г.

81. Третьяк А.А., Борисов К.А., Гроссу А.Н. / Влияние конструктивных особенностей коронок, армированных алмазно-твердосплавными пластинами, на эффективность бурения горных пород / Горный журнал, 2018. - №2. – С. 85–90.

82. Третьяк А.А., Буренков Н.Н., Чихоткин А.В. Режущая часть долота PDC: оптимизация геометрических параметров. / Oil and Gas Journal. Penn Well, 05.2013 №5. С. 56–58.

83. Третьяк А.А., Гроссу А.Н., Борисов К.А. Конструкция буровых коронок, армированных АТП, с учетом схемы разрушения забоя скважины. / Строительство нефтяных и газовых скважин на море и на суше. ВНИИОЭНГ-06.2015, №6. – С. 9–12

84. Третьяк А.А., Кузнецова А.В., Борисов К.А. Определение поломок резцов PDC с помощью регрессионного и нейросетевого моделирования / Известия Томского политехнического университета. «Инжиниринг георесурсов». - 2019. - Т. 330, № 5. - С. 169-177.

85. Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Борисов К.А. / Определение скорости бурения и наработки коронок нового поколения, армированных алмазно-твердосплавными пластинами // Деловой журнал Neftegaz.ru, 2017. – №3. – С. 46–49.

86. Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Борисов К.А. / Алмазные коронки // Деловой журнал Neftegaz.ru - 2016. - №10. - С. 23-33.

87. Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Борисов К.А. Определение рациональных значений рабочих углов армирующих элементов буровых коронок // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2017. № 3 (63). – С. 70–73.

88. Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Борисов К.А., Гроссу А.Н. / Лабораторные исследования износостойкости режущих элементов буровых долот, армированных алмазно-твердосплавными пластинами // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2018. – № 5. – С. 26–30.

89. Третьяк А.А., Литкевич Ю.Ф., Борисов К.А. Влияние крутильных и продольных колебаний на скорость бурения и образование поломок режущих элементов буровых долот, армированных PDC // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2019. - Т. 330, № 12. – С. 135-141.

90. Третьяк А.А., Савенок О.В., Гроссу А.Н., Борисов К.А. Новое двухъярусное долото режущего типа. / Oil and Gas Journal. Penn Well, 05.2015 №5. – С. 50–53.

91. Третьяк А.А., Савенок О.В., Швец В.В. Буровые коронки, армированные алмазно-твердосплавными пластинами. / Монография. ИД «Политехник», г. Новочеркасск, 2015 г., 186 с.

92. Третьяк А.Я, Борисов К.А. / Разработка конструкции долота, армированного АТП / Бурение скважин в осложнённых условиях: материалы Международной научно-практической конференции, 05-06 окт. 2016 г. / СПГУ - СПб.: «ЛЕМА», 2016. – С. 118–121.

93. Третьяк А.Я., Нырков Е.А., Сидорова Е.В., Борисов К.А. Результаты применения новых конструкций буровых долот, армированных резцами гребнеобразной формы PDC // Журнал «Устойчивое развитие горных территорий». – 2019. – Т. 11, № 4(42). – С. 519–257.

94. Третьяк А.А., Сысоев Н.И., Буренков Н.Н. / Расчет конструктивных параметров буровых коронок, армированных PDC // Oil&Gas Journal Russia. 2012. – № 5. – С. 66–69.

95. Трушкин О.Б. Оценка силовой и энергетической загрузки резцов долота типа PDC по результатам стендового бурения [Текст] / О.Б. Трушкин, Е.А. Гусев // Территория Нефтегаз. – 2013. – № 2. – С. 34–37.

96. Чулкова В.В. Опыт применения долот PDC в условиях перемежающихся по твердости горных пород Урало-Поволжского региона / В.В.Чулкова // Вестник ассоциации буровых подрядчиков: Ежеквартальный научно-технический журнал. – 2012. – № 2. – С. 12–15.

97. Чулкова В.В. Ресурсосберегающая технология бурения скважин долотами PDC в условиях перемежающихся по твердости горных пород: М., «Бурение и нефть», № 2, 2015/ – С. 56–57.

98. Шарипов А.Н. Долота для бурения по твердым породам / А.Н. Шарипов, Р.Р. Мингазов // Бурение & нефть. – 2012. – № 12. – С. 46–48.

99. Шиповский И.Е. Реализация контактного взаимодействия инструмента с горной породой при численном моделировании / И.Е. Шиповский // Динамические системы. – Вып. 17. – Симферополь: ТКУ, 2001. – С. 166–171.

100. Юдин Е.К. Низкочастотные колебания бурильного инструмента – М.:«Недра», 1983. –132 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения

результатов научных работ по диссертации в учебный процесс

Утверждаю:

Проректор по образовательной

деятельности ФГБОУ ВО ЮРГПУ (НПИ)

имени М.И. Платова

С.Н.Чеботарев



о внедрении результатов научных работ в учебный процесс

г.Новочеркасск

«__» ____ 2020 г.

Комиссия в составе начальника учебно-методического управления ФГБОУ ВО ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова Апачанова А.С., декана факультета «Геологии, горного и нефтегазового дела» д.т.н., доцента Третьяка А.А., и.о. зав.кафедры «Нефтегазовые техника и технологии» (НТиТ), к.т.н., доцента Рыбальченко Ю.М., профессора кафедры НТиТ Попова В.В., к.т.н., доцента кафедры НТиТ Сидоровой Е.В., составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательских работ полученные в ходе выполнения диссертационной работы Борисова К.А. на тему «Разработка методических и технологических рекомендаций по повышению эффективности бурения скважин путем предупреждения аномального износа режущих элементов долот PDC» внедрены в учебный процесс для обучения студентов третьего и четвертого курсов направлений подготовки бакалавриата 21.03.01 «Нефтегазовое дело» направленность «Бурение нефтяных и газовых скважин» и магистратуры первого и второго курсов 21.04.01 «Нефтегазовое дело» направленность «Строительство нефтяных и газовых скважин в сложных условиях».

Начальник УМУ

Декан ФГГиНГД, д.т.н., доцент

И.о. зав. кафедрой НТиТ, к.т.н., доцент

Д.т.н., профессор кафедры НТиТ

К.т.н., доцент кафедры НТиТ

А.С.Апачанов

А.А.Третьяк

Ю.М.Рыбальченко

В.В.Попов

Е.В.Сидорова

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Акт внедрения
двухъярусных долот, армированных пластинами PDC
в практику буровых работ

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО НПП

«Ростовская буровая компания»

Нагибин А.В.

« » _____ 2020 г.



АКТ

Мы, нижеподписавшиеся, инженер ООО НПП «Ростовская буровая компания» Кубах В.Н. и буровой мастер ООО НПП «Ростовская буровая компания» Чабанов И.В. составили настоящий акт о том, что экспериментальные антивибрационные двухъярусные долота, армированные пластинами PDC, разработанные в ЮРГПУ(НПИ) и испытанные при бурении скважины на территории Ростовской области показали следующие результаты: при диаметре долота 215,9 мм. средняя механическая скорость по горным породам VI–VII категории составляла 29,5 м/час, средняя проходка на долото по горным породам IV–VIII категории достигла 1100 метров, без замены пластин PDC.

Инженер по бурению ООО НПП

«Ростовская буровая компания»

Кубах В.Н.

Буровой мастер ООО НПП «Ростовская

буровая компания»

Чабанов И.В.